



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Studijní program M2301 - Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Analýza vlivu teplotních a deformačních účinků na aluminid Fe_3Al

**The analysis of temperature and deformation effect and its influence on
aluminid Fe_3Al .**

Petr Macháček

KSP – SM – B8

Vedoucí diplomové práce: Prof., Ing. Jiří Dunovský, CSc., ČVUT Praha
Doc., Ing. Heinz Neumann, CSc., TU Liberec
Konzultant diplomové práce: Ing. Petr Císařovský, ČVUT Praha

Rozsah práce a příloh:

Počet stran 73

Počet tabulek 11

Počet příloh 3

Počet obrázků 45

Datum: 27.5.2005



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství

Diplomant: Petr Macháček

Téma práce:

Analýza teplotních a deformačních účinků na aluminid Fe_3Al
The analysis of temperature and deformation effect and its influence on aluminid Fe_3Al .

Číslo DP: KSP- SM) – B8

Vedoucí bakalářské práce: Prof., Ing. Jiří Dunovský, CSc., ČVUT Praha
Doc., Ing. Heinz Neumann, CSc., TU Liberec
Konzultant bakalářské práce: Ing. Petr Císařovský, ČVUT Praha

Abstrakt:

V této práci se zabývám teplotními a deformačními účinky svařovacího procesu a jeho vlivu na základní materiál, hodnocením svařitelnosti kovových materiálů. Z technologických aplikací se věnuji svařovacím procesům pomocí laseru a experimentálnímu programu pro analýzu vlivu laserového svařovacího procesu na aluminid Fe_3Al .

Abstract:

In this job we are interested about a deformation effects welding of the proces and his bearing on basic material, appraisal weldability brasyy clean cloth. In this technologic applications addict welding proces during an experiment program on the analysis action laser welding of the proces for aluminid Fe_3Al .



Poděkování:

V této části bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Jiřímu Dunovskému, CSc., Doc. Ing. Heinzi Neumannovi CSc, konzultantovi Ing. Petru Císařovskému za příkladné vedení v dané problematice a za poskytnuté materiály.



Použité symboly a zkratky :

A	atom v základním stavu
A^*	atom v excitovaném stavu
Al_2O_3	oxid hlinitý
at. %	atomové procento
BET	teleskop pro rozšíření laserového svazku (beam expand telescop)
C [F]	kapacita
CW	<i>kontinuální provoz (continuous wave)</i>
E [J]	energie
f [Hz]	frekvence
f	ohnisková vzdálenost čočky
$h [J \cdot s]$	Planckova konstanta
$I [W \cdot cm^{-2}]$	hustota výkonu optického svazku
L [mm]	vzdálenost mezi elektrodami
LD	nízká divergence (low divergence)
LD rezonátor	uzavřený rezonátor s nízkou divergencí
$\lambda [nm, \mu m]$	vlnová délka
max.	maximální
min.	minimální
N	populace všech energetických hladin
N_i	populace i-té energetické hladiny
Nd	neodym
Nd : YAG	neodym yttrium aluminium granát
obr.	obrázek
t [s]	čas
T [°C]	teplota
$T_{PR} [°C]$	teplota přehřevu
UV	ultra – fialové záření
WCM	vodou chladičí modul (water cooling module)



Obsah :

ÚVOD	str. 6
1. Základní pojmy a charakteristiky	str. 7
1.1. Korpuskulárně-vlnový charakter světla	str. 7
1.2. Druhy elektromagnetického záření	str. 8
1.3. Kvantové přechody	str. 9
1.3.1. Absorpce a emise	str. 10
2. Laser	str. 13
2.1. Princip funkce	str. 13
2.1.1. Aktivní prostředí	str. 13
2.1.2. Optický rezonátor	str. 14
2.1.3. Laserové zesilování	str. 15
2.1.4. Režimy laserů	str. 16
2.2. Klasifikace laserů	str. 18
2.3. Vedení paprsku u Nd:YAG laserů	str. 20
3. Spojování materiálu laserem	str. 21
3.1. Svařování laserem	str. 21
3.1.1. Svařované materiály	str. 23
3.1.2. Příprava svarového spoje	str. 24
3.2. Výhody laserového svařování.	str. 24
3.3. Použití laserového svařování	str. 25
3.4. Hodnocení svařitelnosti kovových materiálů	str. 26
3.4.1. Zkoušení svarů prozařováním	str. 26
3.4.2. Zkoušení svarů ultrazvukem	str. 26
3.4.3. Kapilární defektoskopické zkoušky	str. 26
3.4.4. Zkoušky magnetoinduktivní a elektroinduktivní	str. 27
3.4.5. Metoda vířivých proudů	str. 27
4. Svařitelnost materiálu	str. 28
4.1. Teplotní cyklus svařování	str. 28
4.2. Metalurgie svaru	str. 29
4.3. Deformační cyklus svařování	str. 30
5. Konstrukční materiály na bázi slitin Fe – Al	str. 31
5.1. Úvod intermetalika	str. 31
5.2. Užití slitin na bázi aluminia železa Fe ₃ Al	str. 32
5.2.1. Aplikace slitin Fe ₃ Al	str. 33
5.3. Fyzikálně metalurgické poznatky o aluminia železa Fe ₃ Al	str. 35
6. Experimentální zařízení – JK 701 :	str. 38
6.1. Popis a konstrukce experimentálního zařízení	str. 38
6.1.1. Zdroj laserového svazku	str. 39
6.1.2. Napájení – zdroj	str. 47



6.1.3. Chladicí systém	str. 48
6.1.4. Ovládací panel	str. 49
6.2. Parametry laseru JK 701	str. 49
6.2.1. Hmotnosti zařízení	str. 49
6.2.2. Rozměry zařízení	str. 49
6.2.3. Rozsah parametrů	str. 50
6.3. Provoz a seřizování	str. 50
6.4. Nastavení standardního rezonátoru	str. 50
7. Experimentální část	str. 52
7.1. Návrh a realizace experimentálního programu	str. 52
7.2. Vyhodnocení realizovaných experimentů	str. 57
8. Závěr	str. 71
9. Použitá literatura	str. 72



ÚVOD

Slovo laser pochází z angličtiny. Je složené z počátečních písmen anglického názvu popisujícího jeho funkci: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což se dá přeložit ve smyslu zesílení světla pomocí vynucené (stimulované) emise (vyzáření) záření a používá se k označení novodobého zdroje optického záření. České pojmenování laseru je kvantový generátor světla, obecně je však známé a vžité zkrácené pojmenování Laser. Z názvu je tedy zřejmé, že laser vydává a zesiluje světlo (elektromagnetické záření). Laserové světlo je monochromatické (jednobarevné) koherentní (uspořádané) a má malou divergenci (rozbíhavost). [3]



Obr. 1.1: Rozdíl mezi klasickými a laserovými zdroji záření [3]

Laser je zařízení, které přeměňuje dodávanou energii na laserové světlo. Energii můžeme dodávat různým způsobem, například opticky (světlem výbojky), elektricky, chemicky, atd. Vzhled samotných laserů je velmi různorodý. Záleží na druhu laseru, na jeho konstrukci a v neposlední řadě i na jeho použití. Princip laseru předpověděl již v roce 1916 Albert Einstein, ovšem počátky realizace laseru se datují okolo roku 1960, od té doby bylo objeveno a odzkoušeno velké množství typů při nejrozmanitějším využití. S laserovým paprskem se setkáváme v mnoha oborech lidské činnosti. Běžnému spotřebiteli se dostávají do rukou denně zařízení, která vlastních laserů přímo využívají (např. CD přehrávače, počítačové tiskárny ...), nebo výrobky, které jsou lasery značené (např. obaly potravinářského zboží, čárové kódy ...) a zpracováváné. Lasery se používají k měření vzdáleností a určování směru, k zjišťování polohy i rychlosti pohybu družic v okolí Země, rozpouští molekuly látek apod. Lasery také ovládly řady postupů v medicíně, dále se staly i nástrojem pro řadu průmyslových aplikací, ať již jde o svařování, řezání a obrábění nebo v poslední době rozvíjené mikroobrábění, gravírování a popisování (značení), o různé druhy povrchových úprav, čištění povrchu. Můžeme s ním opracovávat i velice tvrdé materiály. Lze s ním svařovat i materiály dříve nesvařitelné, vrtat otvory do diamantů apod.

Jen málokterý nástroj, který má člověk k dispozici je tak všestranně použitelný jako laser. A jeho role se bude v průmyslových aplikacích stále zvětšovat. [3]



1. Základní pojmy a charakteristiky laseru

Běžné světelné záření je vlnění, které obsahuje vlny nejrozmanitějších délek a frekvencí, spontánně vycházející různými směry. V laseru se poprvé podařilo utvořit podmínky, za kterých se ve vhodném aktivním prostředí vlivem určitého stimulujícího elektromagnetického záření spontánní emise potlačí na úkor emise, vynucené stimulujícím zářením.

Lasery se odlišují od konvenčních strojů zdrojem záření, a tím, že vytvářejí jen jednu barvu spektra (mluvíme o tzv. *monochromatickém* záření) a svazek světla, které se vytváří šíří v uspořádané fázi (mluvíme o tzv. *koherentním* záření) a může *interferovat*. Kromě toho také laser vytváří soustředěný svazek záření tj. s velmi malou *divergencí* (neboli *rozbíhavostí*) při vysoké hustotě záření. Svazek záření je také *ustálený*, málo mění polohu nebo průměr, i na velké vzdálenosti.

Díky koherentnosti paprsku je možné pomocí optického systému soustředit (fokusovat) záření do velmi malého bodu (teoreticky řádově do velikosti vlnové délky záření, prakticky od 0,1 až do 0,001mm), čímž se dají získat hustoty energetického toku až 10^8 W.cm^{-2} . To jsou hodnoty tisíckrát větší než teploty dosahované soustředěním (fokusací) slunečního světla.

Takto koncentrovaná energie je schopná roztavit prakticky každý známý materiál. Dopadem laserového paprsku na materiál umístěný v ohnisku dochází k absorpci záření na povrchu materiálu, a tím i k jeho ohřevu. Teplota v tomto místě bude funkcí hustoty energie fokusovaného laserového paprsku.

1.1. Korpuskulárně-vlnový charakter světla

Moderní fyzika mluví o tzv. *duálním charakteru světla*. Na světlo, v širším slova smyslu na záření, je nutné pohlížet jako na elektromagnetické vlnění (mluvíme o *vlnovém charakteru světla*) i jako na proud částic (*korpuskulární charakter světla*). Přitom v některých případech vystupuje do popředí vlnový charakter, v jiných korpuskulární, takže za určitých okolností se světlo projevuje jako vlnění, zatímco jiné jevy lze vysvětlit pouze na základě představy o světle jako o proudu částic (fotonů).

Kvantová fyzika vysvětluje vznik světla emisí fotonů z kvantových soustav při přechodech těchto soustav ze stavu s vyšší energií do stavu s nižší energií.



Laserový paprsek je ve své podstatě tedy vlnění optického druhu, které patří do skupiny elektromagnetického záření a od jiných druhů záření se liší vlnovou délkou. [3]

1.2. Druhy elektromagnetického záření

Dnes známe celé spektrum *elektromagnetického záření* lišící se pouze svou vlnovou délkou od mnoha kilometrů až po biliótiny centimetru (Tabulka 1.1).

Všechny tyto vlny jsou téže fyzikální povahy. Každá vlna z tohoto širokého spektra má však své specifické vlastnosti. Základní kvalitativní rozdíl je v *přímocharosti šíření*. Elektromagnetické záření ve volném prostoru (vakuu) si je možné představit jako superpozici (složení) rovinných elektromagnetických vln obecně různých *frekvencí* (resp. různých vlnových délek), různých *směrů šíření* a různých *polarizací* (tvarů). Charakteristické vlastnosti elektromagnetického záření jsou pak dány množinou (spektrum) frekvencí vln, množinou směrů vlnových vektorů (úhlovým spektrem), popř. množinou vektorů polarizace a příslušnými amplitudami a fázovými faktory jednotlivých vln.

Tabulka 1.1 – Druhy elektromagnetického záření [2]

Frekvence [Hz]	Označení	Vlnová délka [m]
Nad 10^{20}	Gama záření	pod 10^{-11}
$10^{18} - 10^{20}$	Rentgenové záření	$10^{-9} - 10^{-11}$
$10^{15} - 10^{18}$	Ultrafialové záření	$10^{-7} - 10^{-9}$
$10^{14} - 10^{15}$	Světlo	$10^{-6} - 10^{-7}$
$10^{12} - 10^{14}$	Infračervené záření	$10^{-3} - 10^{-6}$
$10^9 - 10^{11}$	Mikrovlny	$10^{-1} - 10^{-3}$
10^8	Televizní vlny	1
$10^3 - 10^7$	Radiové vlny	10^5

Oblast frekvencí definujících podmnožinu elektromagnetických vln, označovanou jako světlo, je dáno intervalem citlivosti lidského oka (400 až 800 nm). Někdy se proto namísto označení „světlo“ používá označení „viditelné záření“ nebo „optické záření“.

Pod pojmem *optické záření* se v současnosti rozumí záření s vlnovými délkami z viditelné oblasti a přilehlých oblastí infračerveného a ultrafialového pásma.

Lidské oko vnímá signály různých frekvencí z viditelného pásma jako různé barvy. Z následující tabulky (Tabulka 1.2) jsou patrné orientační hodnoty frekvencí a vlnových délek pro některé vybrané barvy.



Tabulka 1.2 – Spektrum optického záření [2]

Frekvence [10^4]	Označení	Vlnová délka [m]
3	Blízké infračervené	$1 \cdot 10^{-6}$
3,9	Červené (hrana)	$7,6 \cdot 10^{-7}$
4,9	Oranžové	$6,1 \cdot 10^{-7}$
5,1	Žluté	$5,9 \cdot 10^{-7}$
5,6	Zelené	$5,4 \cdot 10^{-7}$
6,5	Modré	$4,6 \cdot 10^{-7}$
7,5	Modré (hrana)	$4 \cdot 10^{-7}$
10	Blízké ultrafialové	$3 \cdot 10^{-7}$
1000	Rentgenové	$3 \cdot 10^{-9}$

Jestliže množina frekvencí vln přítomných v elektromagnetickém poli je část spojitého intervalu, mluvíme o *spojitém spektru*. Základní charakteristikou záření se spojitým spektrem je tzv. *spektrální hustota*, kterou definujeme jako plošnou hustotu výkonu spadající do jednotkového intervalu frekvencí v okolí uvažované frekvence. Závislost spektrální hustoty na frekvenci (resp.vlnové délce) se nazývá *spektrální křivka*.

Spektrální křivka závisí na vlastnostech zdroje záření a může být velmi složitá, nebo může vykazovat jednoduché maximum. Často se k vyjádření spektrálních vlastností používá parametr označovaný jako *šířka spektra*.

V mezním (teoretickém) případě, kdy záření obsahuje jen jedinou frekvenční složku diskrétního spektra, mluvíme o *monochromatickém záření*. Monochromatické záření však není totožné s jedinou vlnou. I monochromatické záření může být složeno obecně z vln různých směrů, různé polarizace a různých fází.

1.3. Kvantové přechody

Každá (ideální) izolovaná kvantová soustava setrvává v některém ze svých stacionárních stavů po nekonečně dlouhou dobu. Energie, příslušející tomuto stavu, je přesně dána a nemění se. Říkáme, že se kvantová soustava nachází (setrvává) neomezeně dlouho na příslušné energetické hladině. Ve skutečnosti ovšem žádná kvantová soustava není dokonale izolovaná. Na každou soustavu působí okolní prostředí. Toto vnější působení ovlivňuje vnitřní strukturu soustavy a vyvolává změny jejího stavu.



Změnu jednoho stacionárního stavu kvantové soustavy v jiný nazýváme *kvantovým přechodem*. Jestliže se vnitřní energie kvantové soustavy přeměňuje v energii elektromagnetického záření (nebo naopak), označujeme kvantové přechody jako *zářivé*.

1.3.1. Absorpce a emise

Dochází-li k zářivému kvantovému přechodu mezi dvěma energetickými hladinami E_1 a E_2 ($E_1 < E_2$), kvantová soustava získává nebo ztrácí rozdíl energií $E_2 - E_1$, tato energie může být vyměňována s elektromagnetickou vlnou o frekvenci

$$f = \frac{E_2 - E_1}{h}, \quad (1.1)$$

kde $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ je tzv. Planckova konstanta. Tato frekvence bývá označována jako *frekvence kvantového přechodu*.

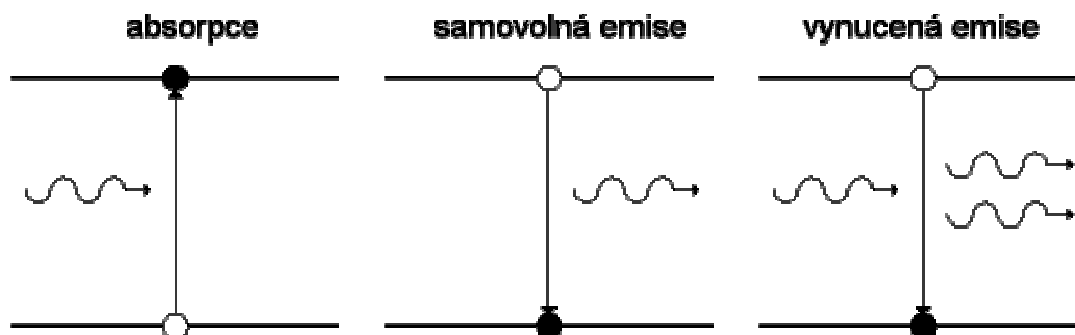
Množství předávané energie $\Delta E = E_2 - E_1 = hf$, je elementární kvantum energie, které vlna o frekvenci f může s kvantovými soustavami vyměňovat.

Toto kvantum energie, nazývané *fotonem*. Na záření o známé frekvenci se pohlíží jako na proud fotonů. Intenzita záření je přímo úměrná počtu fotonů.

Elementární proces *absorpce* záření kvantovou soustavou se interpretuje jako zánik (anihilace) fotonu a současný přechod kvantové soustavy z nižší energetické hladiny E_1 na vyšší E_2 neboli zánik kvantové soustavy s vnitřní energií E_1 a vznik kvantové soustavy s vnitřní energií E_2 .

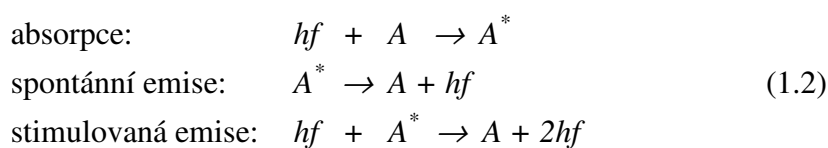
Opačným procesem k absorpci je proces *emise*. Nachází-li se kvantová soustava v excitovaném stavu E_2 , dochází s jistou pravděpodobností k samovolnému (spontánnímu) uvolnění fotonu s frekvencí rovnou frekvenci kvantového přechodu, atom přitom přechází na nižší hladinu E_1 uvažovaného kvantového přechodu. Tento proces se nazývá *spontánní emisí*.

Při dalším a to nejdůležitějším elementárním procesu záření vyvolává rezonanční frekvence f kvantový přechod, při němž je uvolněno kvantum (foton) se stejnou frekvencí f . Směr šíření a polarizace vlny jsou stejné jako směr šíření a polarizace vlny, která kvantový přechod vyvolala. Tento proces bývá označován jako *stimulovaná (vynucená) emise*. [3]



Obr. 1.2: Kvantové přechody [1]

Tři uvedené elementární procesy záření: absorpce, spontánní emise a stimulovaná emise se někdy prezentují relacemi používanými při popisu chemických reakcí:



kde A označuje atom ve stavu s energií E_1 , A^* atom v excitovaném stavu, tj. stavu s energií E_2 a hf označuje foton rezonančního záření.

Právě na principu stimulované emise je založena činnost laseru. Záření vznikající při stimulované emisi má pouze jednu přesně stanovenou frekvenci a pouze jednu vlnovou délku. Je to dáno tím, že fotony, které na sebe paprsek nabírá vznikají při přeskokách atomů mezi stejně vzdálenými hladinami. Na rozdíl od spontánní emise, kdy je energie nevhodně rozdělena do širokého spektra záření, dává nám stimulovaná emise světlo jednobarevné (monochromatické), jeho frekvence a vlnová délka jsou přitom vysoce stabilní.

Stimulované záření není vyzařováno všemi směry, nýbrž podle zákona zachování impulsu přesně směřováno. Vzniklý paprsek je tedy velmi úzký a světelná energie koncentrována v malé oblasti prostoru (divergentní).



K praktickému využití stimulované emise je třeba:

1. Vytvořit nerovnovážný stav, kdy bude více atomů na vyšších energetických hladinách než na hladinách nižších. V takovém případě hovoříme o populační inverzi a prostředí nazýváme aktivním prostředím.

2. Najít způsob, jak udržet paprsek uvnitř aktivního prostředí dostatečně dlouhou dobu, aby stihnul nabrat co nejvíc energie vynucených emisí. Tedy vytvořit příslušný rezonanční obvod se zpětnou vazbou.



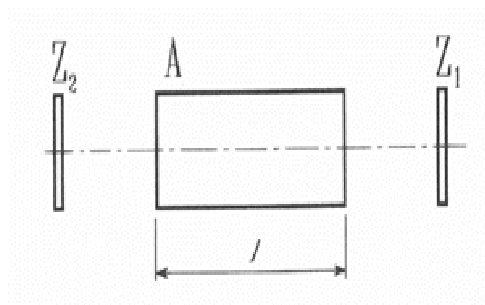
2. Laser

Jako systémy pro opracování materiálů laserem označujeme stroje, zařízení nebo přístroje, jejichž pomocí lze materiál laserovým paprskem tvářet, přetvářet, dělit, svařovat, povrstvovat nebo měnit jeho látkové vlastnosti. Tyto systémy pro opracování materiálu laserem jsou nazývány laserové systémy.

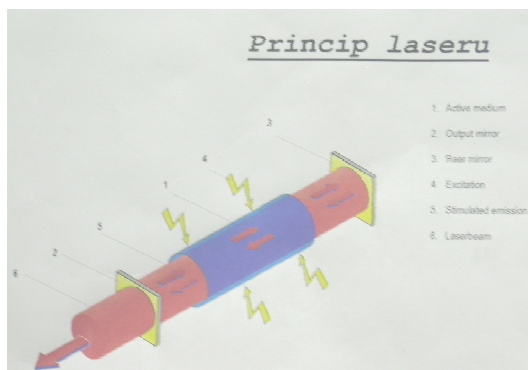
2.1. Princip funkce [6]

Obecně se slovo laser používá pro označení generátoru optického záření. Uvažujeme-li jen o zesilování optického záření, hovoříme o laserovém zesilovači.

Laser – generátor je realizován umístěním dostatečně buzeného aktivního zesilujícího prostředí (A) do optického rezonátoru, tj. laser je vlastně laserový zesilovač s kladnou zpětnou vazbou uskutečňovanou zrcadly optického rezonátoru Z_1 a Z_2 .



Obr. 2.1: Schéma laseru – generátoru



Obr. 2.1.1. : Princip laseru

2.1.1. Aktivní prostředí

Vhodným umístěním aktivního prostředí do optického rezonátoru vzniká laser. Aktivní prostředí bývá ve tvaru válce nebo kvádra, jehož osa koinciduje s optickou osou rezonátoru. Záření šířící se ve směru optické osy je v aktivním prostředí zesilováno, na zrcadlech se odráží buď úplně (totálně reflexní zrcadlo), nebo částečně (polopropustné zrcadlo) a znovu vstupuje do zesilujícího prostředí. Záření prostupující polopropustným zrcadlem představuje výstup z laseru. Z hlediska optického rezonátoru to jsou činné ztráty. Aktivní prostředí je soubor kvantových soustav rozmístěných v jisté konečné části prostoru,



kteřé byly buzením vyvedeny ze stavu termodynamické rovnováhy. Jejich celková vnitřní energie je větší než celková vnitřní (rovnovážná) energie před začátkem působení buzení.

Pro jednoduchost předpokládám, že všechny kvantové soustavy jsou stejné a uvažuji jen systém o dvou energetických hladinách E_1 a E_2 ($E_1 < E_2$) těchto kvantových soustav. Ve stavu termodynamické rovnováhy by populace N_1 a N_2 příslušných energetických hladin byly dány Boltzmannovým rozdělením, tj. $N_2 < N_1$. V aktivním prostředí však toto neplatí. N_2 je tak velké, že je mezi energetickými hladinami ustavena tzv. inverze populace hladin, tj. platí $N_2 > N_1$.

Při inverzi populace hladin může toto prostředí sloužit jako zesilovač (kvantový zesilovač), neboť při interakci s látkou převažuje při kvantových přechodech mezi uvažovanými hladinami stimulovaná emise nad absorpcí. Zesilováno je rezonanční záření (tj. záření s frekvencí rovnou frekvenci uvažovaného kvantového přechodu $f = (E_2 - E_1) / h$).

Pokud tedy aktivním prostředím prochází vlna optického záření s rezonanční frekvencí f , a počáteční intenzitou I_0 je zesílena a vystupuje s intenzitou I . Je-li rozdíl populace hladin $N_2 - N_1$ nezávislý na prostorové souřadnici, tj. prostředí je homogenní, potom je narůstání intenzity I elektromagnetické vlny exponenciální se vzdáleností z , kterou elektromagnetická vlna urazí v aktivním prostředí a tedy $I = I_0 e^{\alpha z}$, kde I_0 je intenzita záření v rovině $z = 0$ a $\alpha = \sigma (N_2 - N_1)$ je součinitel zesílení (σ - materiálový parametr). Je zřejmé, že intenzita záření I bude vzrůstat se vzdáleností z , pokud $\alpha > 0$, tzn. $N_2 > N_1$, a tedy pokud bude zajištěna inverze populace hladin. [6]

2.1.2. Optický rezonátor

Optickým rezonátorem se rozumí zařízení, které je schopné hromadit, nebo na jistou dobu udržet optické záření v omezené oblasti prostoru. Optické rezonátory obecně mohou být složeny z odrazných ploch různých tvarů. V žádném reálném rezonátoru však není možné energii uchovat po nekonečně dlouhou dobu. Pokles energie v nabuzeném rezonátoru určují především jeho vlastní ztráty.

Zrcadla mají konečné rozměry, prostor v němž dochází k soustředění energie optického záření není uzavřen. Rezonátor tedy označujeme jako *otevřený*.

Základní rozměry otevřeného rezonátoru jsou vzdálenost L odrazných ploch (zrcadel) a příčný rozměr zrcadel a . Zrcadla musí být od sebe vzdálená o celistvý počet půlvln uvažovaného záření tj.: $L = n\lambda / 2$. Je-li příčný rozměr podstatně menší než vzdálenost, dochází k významnému úniku energie optického záření z otevřeného rezonátoru. Ztráty energie takto vznikající se nazývají *difrakční ztráty*.



Difrakční ztráty jsou dány skutečností, že vnější rozměry rezonátorových zrcadel a dalších optických komponentů mají malé rozměry. Záření, které postupuje směrem k zrcadlu, částečně zrcadlo „obtéká“ a nevrací se zpět. Difrakční ztráty otevřeného rezonátoru rostou, pokud klesá příčný rozměr zrcadla a , nebo roste délka L rezonátoru. Jsou také tím větší, čím je větší vlnová délka λ . Proto, aby difrakční ztráty byly zanedbatelné, musí platit:

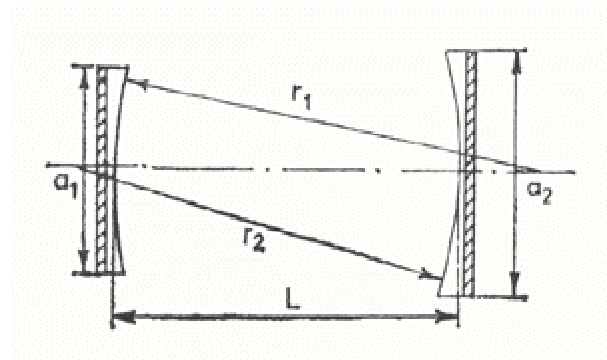
$$N_F = \frac{a^2}{4\lambda L} \gg 1 \quad (2.1)$$

Bezrozměrný parametr N_F je nazýván *Fresnelovým číslem*. (Velikost Fresnelova čísla je tedy kritériem velikosti difrakčních ztrát rezonátoru.)

Rezonátor musí být konstruován tak, aby všechny jeho ztráty byly menší než zesílení optického záření v aktivním prostředí. Nejčastěji používané otevřené rezonátory jsou tzv. sférické rezonátory, tvořené dvěma kulovými odraznými plochami s poloměry r_1 a r_2 .

Jejich zvláštními případy jsou rezonátory :

- planoparalelní* $r_1 = r_2 = \infty$
- konfokální* $r_1 + r_2 = 2L$
- koncentrický* $r_1 + r_2 = L$
- hemisférický* $r_1 = L, r_2 = \infty$



Obr. 2.2: Otevřený sférický rezonátor [3,6]

Otevřené sférické rezonátory jsou definovány průměry vnějších rozměrů a_1 , a_2 , poloměry křivostí zrcadel r_1 , r_2 a vzdáleností zrcadel L .

2.1.3. Laserové zesilování

Z předchozího textu plyne, že součinitel zesílení α aktivního prostředí je nenulový jenom pro záření, jehož frekvence se rovná frekvenci kvantového přechodu $f = (E_2 - E_1) / h$. Přesně definované hladiny energie E_1 , E_2 jsou teoretickým modelem, odpovídající stacionárním stavům izolovaných kvantových soustav. V reálných podmínkách však energetické hladiny E_1 a E_2 bývají „rozmazány“ v důsledku interakce kvantových soustav s okolním prostředím. Součinitel zesílení je v reálných podmínkách nenulový v jistém

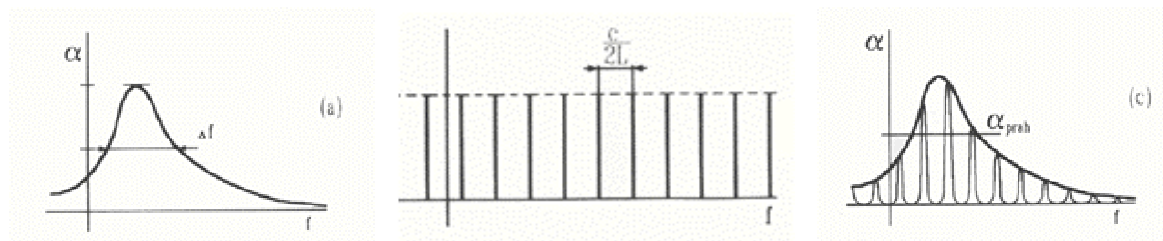


intervalu frekvencí Δf v okolí střední frekvence $f_{stř.}$. Aktivní prostředí zesiluje záření s frekvencí v tomto intervalu. Závislost součinitele zesílení na frekvenci se označuje jako *spektrální křivka* (obr. 2.3 a).

Zesilování záření prostřednictvím stimulované emise je tím účinnější, čím je větší jeho intenzita. V optickém rezonátoru je intenzita záření největší, jestliže frekvence záření odpovídá některé rezonanční frekvenci optického rezonátoru. Těchto frekvencí je v rezonátoru nespočetně mnoho (obr. 2.3 b), graf má tvar „hřebenu“.

Záření z různých módů je zesilováno různě, a to podle velikosti součinitele zesílení aktivního prostředí při příslušných rezonančních frekvencích optického rezonátoru (obr. 2.3 c). Jestliže je křivka součinitele zesílení velmi úzká ve srovnání s frekvenční vzdáleností rezonátorových módů, je laserové záření kvazimonochromatické (laseruje jen jeden mód). Nebývá však snadné vybrat prostředí a rezonátor tak, aby docházelo k jednofrekvenční generaci.

Zpravidla však má výstupní záření laseru několik frekvencí, přesněji frekvence, odpovídající těm módům, pro něž je součinitel zesílení α větší než prahová hodnota α_{prah} (určena ztrátami rezonátoru).



Obr. 2.3 a), b), c): Frekvenční spektra [1]

2.1.4. Režimy laserů

Ideální laser je zdrojem záření jisté frekvence, která se rovná jednak frekvenci kvantového přechodu aktivního prostředí v rezonátoru, jednak rezonanční frekvenci optického záření, v němž se prostředí nachází. Jestliže vnější působení, které dodává vnitřním stavům kvantových soustav energii (buzení), je nezávislé na čase a jestliže i všechny geometrické parametry laserového systému jsou na čase nezávislé, laser pracuje v *kontinuálním* režimu, vystupuje z něho optické záření o stálé intenzitě, dané saturačními vlastnostmi zesilujícího prostředí a ztrátami optického rezonátoru.



Ve většině případů však výstupní intenzita v závislosti na čase významně fluktuuje. Příčinami jsou jednak mnohomódová činnost, projevující se složitým spektrem vzájemně fázově nekorelovaných vln, ale také fluktuace buzení, délky optického rezonátoru (která způsobuje posouvání rezonančních frekvencí), fluktuace ztrát v rezonátoru apod.

K zajištění stabilního výstupu je třeba stabilizovat všechny fyzikální parametry a konstrukční prvky. Například, aby nedocházelo k chaotickým změnám módových frekvencí, umísťují se zrcadla rezonátoru na optickou lavici z materiálu s malým součinitelem roztažnosti, stabilizuje se teplota lavice, zavádí se elektronické zpětnovazební obvody, které doladují okamžité nastavení zrcadel apod.

Vedle kontinuální činnosti je známa řada způsobů jak generovat *laserové impulsy optického záření*. Jsou založeny na ovládání některých parametrů dodatečných prvků uvnitř nebo vně optického rezonátoru. Detaily metod generace impulsů optického záření, zejména tehdy, kdy je přísně předepsána i vlnová délka, jsou zvláštní oblastí laserové techniky, která je dosud ve stádiu intenzivního výzkumu.

Pro generaci impulsů, jejichž doba trvání přesahuje několik desítek mikrosekund, se používá impulsní buzení. Pro generaci nanosekundových impulsů se řízeným způsobem mění vlastnosti (nejčastěji ztráty) optického rezonátoru (tzv. Q-spínání). Generace impulsů pikosekundových délek a kratších se zpravidla opírá o metodu synchronizace módů.

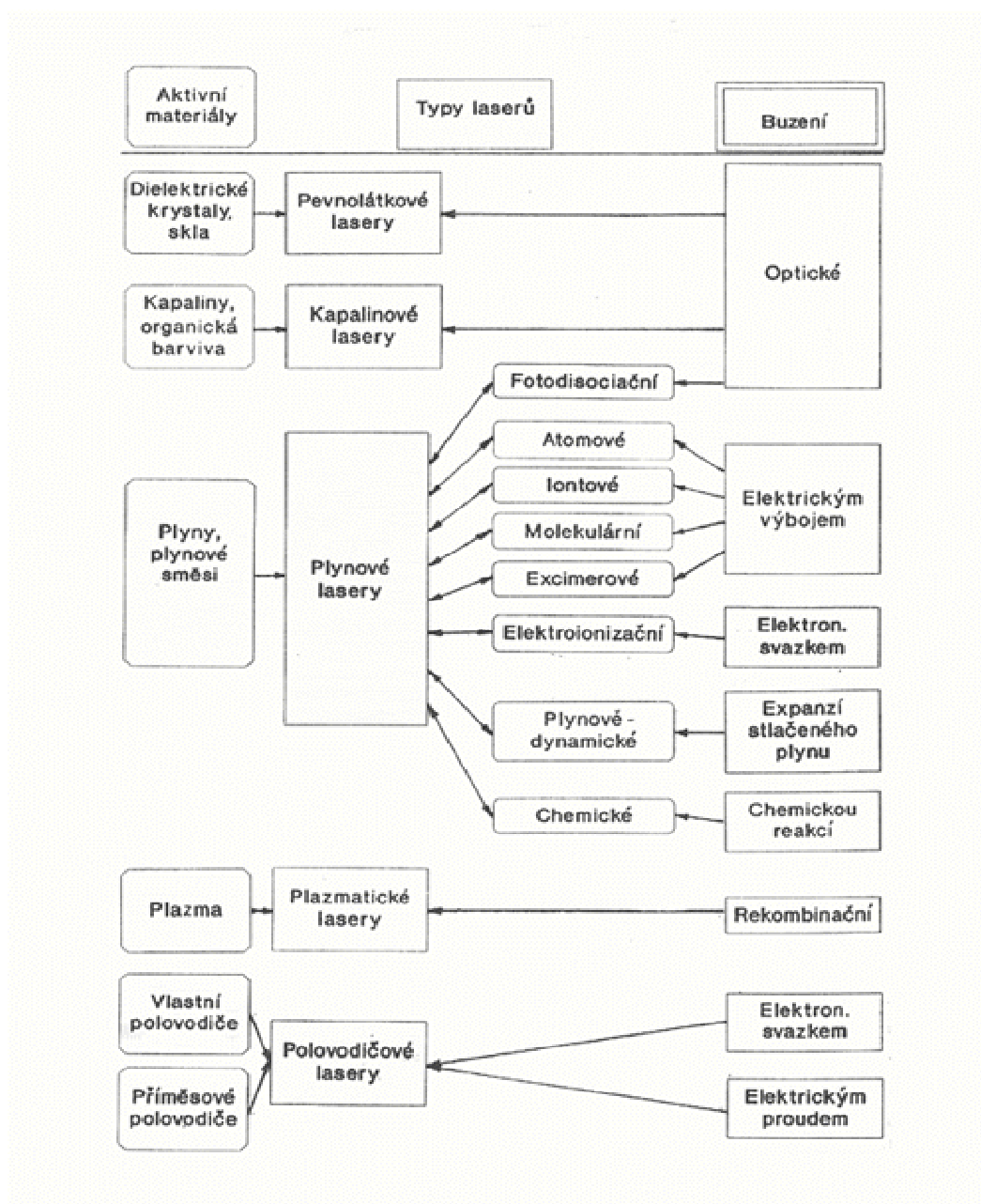
Vystupuje-li z laseru jeden osamocený impuls, mluvíme o *impulsním* laseru. Vystupuje-li z laseru sled pravidelně se opakujících impulsů označujeme jej jako *laser pulsní*. [6]



2.2. Klasifikace laserů

Lasery mohou být klasifikovány podle různých hledisek, např. podle :

- a) aktivního prostředí
 - pevnolátkové - polovodičové - plynové - kapalinové - plazmatické
- b) vlnových délek optického záření, které vysílají
 - infračervené - viditelného pásma - ultrafialové - rentgenové
- c) typu kvantových přechodů (zúčastněných energetických hladin)
 - molekulární (rotační, rotačně vibrační, vibrační) - elektronové - jaderné
- d) typu buzení
 - opticky - elektrickým výbojem - elektronovým svazkem - tepelnými změnami - chemicky - rekombinací - injekcí nosičů náboje
- e) časového režimu provozu laseru
 - impulsní - pulsní - kontinuální
- f) doby trvání generovaného impulsu
 - s dlouhými impulsy - s krátkými impulsy
s velmi krátkými impulsy (piko-, femto-sekundové)



Tabulka 2.1: Přehled typů laserů [6]



2.3. Vedení paprsku u Nd:YAG laserů

Lasery Nd:YAG světlo přivádějí na pracovní místo světlovodnými vlákny a u vysoce reflexivních materiálů (např. u mědi) vykazují vyšší absorpční stupeň. Laserově aktivní medium neodým (ionty Nd^{3+}) je u těchto laserů uloženo v pevné látce z granátu yttria-hliníku (YAG), který má obvykle tvar kruhové tyče. Optické vybuzení se děje u pulzních laserů (P lasery) všeobecně kryptonovými výbojovými elektronkami

Protože vlnová délka Nd:YAG laserů leží v oblasti blízkého infračerveného (IR) záření o vlnové délce $1,06 \mu\text{m}$, což se blíží oblasti viditelného záření, jsou vlastnosti tohoto záření podobné viditelnému světlu. V této oblasti spektra absorbují kovové materiály poměrně vysoké procento záření. Tato skutečnost dovoluje používání skla pro zaostřovací čočky a pro ochranná skla, jak je tomu běžné v oblasti viditelné optiky. Křemenné sklo, které je možno použít jako materiál pro světlovodná vlákna, je pro Nd:YAG lasery stejně propustné jako pro viditelné světlo. V závislosti na pracovním postupu nebo na příslušné systémové technice může být výhodné přivádět paprsek na opracovávaný materiál buď přímo (*pevná optika*) nebo na rozdíl od např. CO_2 laserů, světlovodnými vlákny (*vláknová optika*). [6]



3. Spojování materiálu laserem

V oblasti spojování materiálu je možné lasery s výhodou používat pro svařování (a to kontinuální i bodové svařování) a pájení.

Pro svařování se používají nejčastěji lasery pevnolátkové nebo plynové s aktivními materiály Nd : YAG a CO₂. Lasery mohou pracovat v provozu pulsním, kdy se frekvence řídí podle technologických požadavků. Při bodovém svařování (nebo i vrtání) se doba pulsu pohybuje obvykle v rozmezí 1 až 10 ms. Při vyšších frekvencích se pracuje obvykle v režimu, který se nazývá Q-režim, kdy doba pulsu a charakter výstupního signálu je řízen nejčastěji akustooptickým členem v systému rezonátoru.

Pro svařování podélných a rotačních svarů se používají lasery pracující kontinuálně v tzv. CW-režimu, (Continuous wave režim). Kontinuálně provozovanými lasery je možné dosáhnout velké provozní rychlosti. Vysoká kvalita paprsku laseru s provozně přesnou ohniskovou vzdáleností a malým vkladem tepla do obrobku jsou předpokladem pro vysokou provozní rychlost. Hospodárně jsou odpovídající kvality paprsku dosahovány v provozu CW především u CO₂ laserů .

Pevnolátkové technologické lasery pracují většinou v pulsním provozu s opakovací frekvencí do 100 Hz. Mohou však pracovat i při vyšších frekvencích v Q- režimu. Velikost a technologický účinek pulsu se hodnotí podle celkové výstupní energie pulsu.

Plynové lasery nacházejí stále častější a významnější uplatnění ve výrobních technologiích. Pro svařování CO₂ laserem se používají ochranné plyny (jako např. argon, helium, dusík). Vnášení energie se při tomto způsobu svařování příznivě ovlivňuje ochranným plynem. Ochranné plyny zvyšují a stabilizují stupeň absorpce plasmatu indukovaného laserem při svařování CO₂ laserem, takto může energie laserového paprsku zcela vniknout do materiálu a zvýšit efekt hloubkového svařování.

3.1. Svařování laserem

Působením laserového paprsku s intenzitou řádově 10³W/mm² na svařovaný materiál dochází k přetavení povrchových a podpovrchových vrstev. Když v okamžiku roztavení přestane záření laseru působit, ztuhnutí materiálu vytvoří se svar. Principem laserového svařování je přetavení materiálu do určité hloubky a jejich vzájemné spojení.

Svařování laserem záleží na několika parametrech, a to : vlnová délka, energie, formování výstupního paprsku a druh transversálního módu určují způsob, jakým laser



zahřívá materiál obrobku. Průběh pulsu resp. dobu expozice určují hloubku tepelného průniku.

Proces laserového svařování je obecně technologicky náročnější operace než řezání. Avšak využití laserů při tomto procesu je poměrně široké. Lasery svařující metodou SPP (metoda svařování průchozím paprskem) nepotřebují k provozu vakuum a účinky vysokovýkonných laserů jsou srovnatelné s elektronovým paprskem. Svařování laserovým paprskem dělíme na svařování vedením tepla a hloubkové svařování.

Při svařování vedením tepla se materiál taví absorpcí a vedením tepla vyvolaného laserovým paprskem. Tento postup umožňuje svařování jen do malých hloubek materiálu.

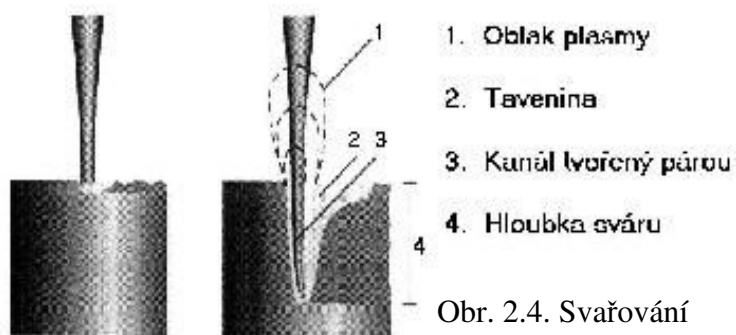
Zvýšení efektivity postupu umožňuje svařování do hloubky. Nutná intenzita svařování závisí na materiálu, na vlnové délce, na polarizaci a na rychlosti posuvu.

Hloubka svaru závisí na teplotní vodivosti a na specifickém teple svařovaného materiálu a těmito vlastnostmi je limitovaná rychlost svařování. Závislost hloubky svaru na rychlosti svařování má hyperbolický průběh.

Hloubkové sváření (keyholing – angl.) se zakládá na principu laserového svařování a vrtání. Paprsek nejdříve odpaří určitou povrchovou vrstvu povrchu, přičemž může vnikat do větší hloubky. Zároveň

v důsledku tepelné vodivosti roztaví okraje ozařovaného místa a zalívají vznikající díru po předchozím odpaření. Paprsek se přitom pohybuje a není stále nasměrovaný do stejného místa. Výkonové kontinuální CO₂ lasery s výkonem nad 1 kW se používají na sváření masivnějších materiálů a do větších hloubek.

Princip svařování laserem



Sváření vedením tepla → Hloubkové svařování

Při porovnání laserového svařování a svařování elektronovým paprskem má laserové sváření mnohé výhody, jako např. to, že paprsek může být vedený atmosférou resp. jinou směsí plynu, není ovlivnitelný vnějším elektrickým či magnetickým polem, je lehce usměrňovatelný zrcadly a mnohé další výhody spojené s nutností svařovat elektronovým paprskem ve vakuu.



Proces laserového svařování je obecně technologicky náročnější operace než řezání. Avšak využití laserů při tomto procesu jsou poměrně široké. Lasery svařující metodou SPP (metoda svařování průchozím paprskem) nepotřebují k provozu vakuum a účinky vysokovýkonných laserů jsou srovnatelné s elektronovým paprskem.

Svařování laserovým paprskem dělíme na svařování vedením tepla a hloubkové svařování.

Při svařování vedením tepla se materiál taví absorpcí a vedením tepla vyvolaného laserovým paprskem. Tento postup umožňuje svařování jen do malých hloubek materiálu.

Zvýšení efektivity postupu umožňuje svařování do hloubky. Nutná intenzita svařování závisí na materiálu, na vlnové délce, na polarizaci a na rychlosti posuvu. [7,9,]

3.1.1. Svařované materiály

Principiálně mohou být laserem svařovány materiály, které je možné svářet konvenčními způsoby, v mnohých případech i se zvýšenou kvalitou a větší rychlostí.

Obsah uhlíku ve svařovaném materiálu by neměl být vyšší než 0,2%. Většinu materiálů svařitelných běžnými metodami je možno svařovat i laserem, často mnohem rychleji a s lepšími vzhledovými výsledky. Díky velice malému tepelně ovlivněné oblasti kolem svaru je v některých případech možné svařovat i materiály, které je velice problematické svařovat konvenčními metodami.

Vynikajícím materiálem pro svařování laserem jsou nerezavějící oceli, kde se dosahuje homogenního svaru bez pórů, dále nízkouhlíkové oceli s obsahem uhlíku do 0,3% bez výrazných znečišťujících příměsí a s nízkým obsahem síry.

Vhodnými materiály jsou i méně obvykle používané materiály, jako titanové, zirkoniové a chromniklové slitiny a některé slitiny s relativně nízkou elektrickou vodivostí bez prchavých příměsí.

Kovy jako hliník nebo měď nejsou příliš vhodné (pro svařování plynovými lasery) z důvodu vysoké reflexivity povrchu vůči CO₂ záření a vyžadují proto speciální postup a velkou opatrnost. Oceli s vysokým obsahem uhlíku nebo materiály obsahující vměstky (např.: mnoho vysokolegované slitiny) jsou svařitelné speciálními svařovacími technologickými postupy a musí být podrobeny tepelnému zpracování před a po svařování. Materiály obsahující prchavé příměsi nejsou velmi vhodné pro svařování laserem. Typickým příkladem těchto materiálů jsou mosazi, galvanická ocel, magnetické slitiny a zinek.

Svařování hliníkových slitin vyžaduje vzhledem k vysoké optické reflexivitě a vysokému koeficientu tepelné vodivosti těchto materiálů odpovídající vysokou energetickou



hustotu v ohnisku laserového paprsku. Ta se může získat buď vysokým výkonem paprsku nebo dobrou zářivou kvalitou laseru.

3.1.2. Příprava svarového spoje

Správné sestavení svarového spoje je při laserovém svařování velmi důležitým faktorem. Laser je velice přesný nástroj vyžadující poměrně vysokou úroveň přípravy. Typická šířka stopy při svařování vysokovýkonovým laserem je asi 1 mm a mezera pro svařování by neměla překročit 25% šířky této stopy. Jen tak je zajištěna správná fáze svarových ploch. U většiny laserových svarů se nepoužívá přídavný materiál, proto musí být mezery mezi plochami svaru velice úzké, jinak mohou vznikat vruby.

Laser může být použit i pro svařování s přeplátováním s částečným nebo úplným průvarem. Požadavky pro nastavení šířky mezery mezi plochami budoucího svaru jsou v tomto případě méně přísné.

Další možností používanou při laserovém svařování je oboustranný tupý spoj. V tomto případě vytvoří laserový paprsek jednoduchou stopu po obou stranách na tupo spojovaných součástích. Při svařování laserem je možné použít také přídavný materiál, a to buď ve formě drátu přidávaného do svaru nebo plnicí kovové vložky. V tomto případě je možné tolerovat větší mezery mezi stěnami budoucího svaru. Přídavným materiálem je možno i ovlivnit chemické složení svaru a zvýšit např.: svařitelnost vysokouhlíkových ocelí. [7]

3.2. Výhody laserového svařování.

V dnešní době laserové svařování konkuruje mnohým, doposud používaným způsobům spojování materiálu jako např.: pájení, obloukové svařování, odporové svařování a svařování elektronovým paprskem.

Svařování laserem poskytuje následující výhody :

- bezkontaktní svařovací proces
- umožňuje lokální zahřátí a s tím spojené intenzivní ochlazení odvodem tepla do okolního materiálu, minimální vznik tepelně ovlivněné oblasti a malé zbytkové vnitřní pnutí
- úzký svar jako výsledek úzké stopy dopadu laserového paprsku
- schopnost svařovat různorodé kovy, těžko svařitelné konvenčními metodami
- schopnost svařovat materiály v kontrolované atmosféře



Laserové svařování má oproti jiným metodám řadu předností, kromě již uvedených obecných výhod pro laserové technologie :

- efektivní hluboké svary mohou být provedené u materiálů o tloušťce až 12 mm
- laserové svařování probíhá s malým vstupem energie na jednotku délky, jehož výsledkem jsou malé deformace
- kvalita svaru
- nedochází k žádnému znečišťování svaru materiálem elektrod.
- rychlé chladnutí a celkový vzhled svaru

Velkou výhodou použití laserů při svařování je možnost dosažení velké hloubky průvaru při malé tepelně ovlivněné oblasti, k dosažení tohoto efektu je však zapotřebí přivedení jisté mezní energie (plošné hustoty výkonu) do místa svaru. Tato hodnota je závislá na svařovaném materiálu, vlnové délce laserového záření a jeho polarizaci a rychlosti posuvu.

Uvedené výhody laserového svařování platí všeobecně a přímo nezávisí na druhu použitého laseru.

3.3. Použití laserového svařování [7]

Obecně můžeme říci že tato technologie je vhodná tam, kde je nutné zrealizovat velmi náročné svary z hlediska sériové a hromadné výroby, při požadavku automatizace celého procesu.

Hlavním odbytištěm uvedené technologie jsou :

- strojírenská výroba, zvláště pak výroba automobilů
- zbrojní výroba
- elektrotechnická výroba
- výroba zdravotnické techniky

Laserovým svařováním se např. spojují :

- hermetická pouzdra
- miniaturní relé
- kardiostimulátory
- plechy v automobilovém průmyslu



3.4. Hodnocení svařitelnosti kovových materiálů [16]

Nedestruktivní kontroly svarů mají svoje specifické přednosti ale i nedostatky určené svými různými fyzikálními principy. Každá z defektoskopických metod má tudíž omezenou rozlišovací schopnost v oblasti hodnocení velikosti a druhu vad.

3.4.1. Zkoušení svarů prozařováním

Vyšetřování svaru prozařováním, tj. s použitím metody, která spočívá nediferencovaném zeslabení pronikavého záření vlivem vad, při jeho průchodu svarovým spojem a na působení rozdílně zeslabeného záření zpravidla na citlivou vrstvu vhodně polohovaného filmu. Tato metoda je vhodná pro zjištění vnitřních vad prostorových, tj. dutin vyplněných plynem nebo struskou.

3.4.2. Zkoušení svarů ultrazvukem

U této metody se využívá ke zjišťování vnitřních necelistvostí svarových spojů svazku ultrazvukových vln, tj. vhodně směřovaných mechanických vysokofrekvenčních kmitů, jejichž přímočaré šíření materiálem je ovlivněno případným výskytem vnitřních vad, a to v důsledku náhlých změn akustických vlastností dílčího prostředí, kterým ultrazvuk prochází. Na hranicích útvaru necelistvosti pak nastává útlum, odraz, ohyb nebo rozptyl ultrazvukového vlnění, takže za vadami se vytváří částečný nebo úplný stín. Principiálně se nejčastěji používá pulsního provozu širokopásmového zdroje ultrazvukových kmitů (0,5-12 MHz).

3.4.3. Kapilární defektoskopické zkoušky

Kapilárními metodami lze zjistit jen takové materiálové vady, které bezprostředně vyúsťují až k povrchu materiálu. Při kontrole svarových spojů jde o zjišťování drobných povrchových trhlin a pórů, případně hodnocení těsnosti svarů malých tloušťek.

Princip kapilární metody:

Jde o použití vhodné kapilárně aktivní detekční kapaliny. Díky jejímu nízkému povrchovému napětí, vysoké hodnotě vztlakovosti ve vztahu k její viskozitě a hustotě postupně tato kapalina proniká do necelistvostí a po odstranění jejího přebytku z povrchu zkoušeného materiálu vzlíná vlivem sacího účinku na povrch nanesené vývojky a působení kapilárních sil, a takto necelistvost zviditelní.

Z hlediska chemické aktivity detekční kapaliny je možno dělit kapilární metody na:

- zkoušky s použitím kapaliny chemicky pasivní: zkoušky barevnou kapalinou a fluorescenční kapalinou
- zkoušky s použitím kapaliny chemicky pasivní: zkoušky leptací (uvolňují částičky kovu často uzavírající vadu po mechanickém opracování).



3.4.4. Zkoušky magnetoinduktivní a elektroinduktivní

Použitelnost této metody je určena pouze pro feromagnetické materiály a pro indikaci materiálových vad povrchových nebo těsně podpovrchových. Je převážně využívána pro podchycení povrchových trhlin orientovaných všemi směry. Vady jsou při zkoušce indikovány s využitím rozptylového magnetického pole, které vždy vzniká v okolí místa necelistvosti.

Nutnou podmínkou pro zjištění vady je vybuzení magnetického pole, které prochází zkoušeným předmětem ve směru kolmém k necelistvosti. Silokřivky mgt. pole jsou v neporušené oblasti materiálu rovnoběžné s povrchem. Jejich hustota však v trhlíně mnohonásobně vzroste a proto se vychýlí směrem ven do nemagnetického prostředí.

3.4.5. Metoda vířivých proudů

V principu jde o vytvoření v elektricky vodivém zkoušeném materiálu složky vířivých proudů, které vzhledem k poměru vysoké použité frekvenci se rozkládají těsně pod povrchem součásti. V případě vady se poruší základní rozložení vířivých proudů a porucha je vazební sondou sejmuta a po elektronickém zpracování indikována.



4. Svařitelnost materiálu

Svařování vždy znamená ovlivnění materiálu v určité šířce. Oblast, která má účinkem sváření změněné strukturní, mechanické, chemické resp. jiné vlastnosti nazýváme ovlivněnou oblastí.

Svařitelnost je komplexní charakteristika, vyjadřující vhodnost materiálu vytvořit svarový spoj požadovaných mechanických, fyzikálních a chemických vlastností při určitých metalurgických, technologických a konstrukčních možnostech s cílem dosažení požadované jakosti, spolehlivosti a zejména životnosti spoje.

Metalurgické vlastnosti se zajišťují způsobem výroby materiálu, chemickým složením, způsobem odlévání, tvářením a dalším tepelným zpracováním.

Technologické požadavky se zajišťují metodou svařování, přídavným materiálem, postupem svařování, tepelným režimem svařování a tepelným zpracováním po svařování.

Konstrukční požadavky se zajišťují pevnostními vlastnosti materiálu, tloušťkou a tvarem spoje, dále pak přípravou svarových ploch a hran, celkovou tuhostí spoje a přístupem ke spoji.

Během svařování i po svařování mohou vzniknout nežádoucí jevy např.: ve formě trhlin za horka, za studena, lamelární trhliny a žíhací trhliny.

4.1. Teplotní cyklus svařování

Příčinou teplotního cyklu svařování je pohybující se zdroj tepla, který působí v oblasti svarového spoje. Při svařování laserovým paprskem vzniká teplo v důsledku málo účinného odrazu koherentního světelného paprsku.

Vývoj tepla a nebo konvekce tepla zapříčiňují v nesvarovém spoji vznik teplotního cyklu. Teplotní cyklus se vyznačuje oblastí ohřevu, tj. vzrůstem teploty až na maximální teplotu, která může ležet „nad“ nebo „pod“ teplotou tavení při svařování v pevném stavu. Ohřev na maximální teplotu laserovým paprskem je extrémně rychlý. Po dosažení maximální teploty nastává fáze ochlazování, jejíž tvar a kinetika závisí taktéž na způsobu a podmínkách svařování.

Jednotlivé teplotní cykly lze charakterizovat rychlostí ohřevu, maximální teplotou, způsobem a rychlostí ochlazování. Protože tvar teplotních cyklů úzce souvisí se způsobem ovlivnění svařovaného materiálu, má kategorizace tvaru teplotních cyklů v oblasti svařovaného spoje velký význam. [7,12]



Každý cyklus má tři veličiny:

- rychlost ohřevu na maximální teplotu cyklu
- maximální teplota cyklu
- způsob anebo rychlost ochlazování.

Maximální teplota cyklu je důležitou veličinou z hlediska očekávaných strukturních změn v oceli. Nejvyšší teplota je pozorovaná ve svařovaném kovu.

Zatímco při většině svařovacích technologií je ohřev ve větší části cyklu lineární, ochlazování teplotního cyklu jako lineární brát nelze, většinou má exponenciální tvar. V tepelně ovlivněné oblasti klesá od čáry přechodu. Ochlazování teplotního cyklu lze brát v teplotní oblasti 800 až 500 °C, kdy tato část není lineární. Ovšem ve vysokopevnostních ocelích tato přeměna z $\gamma \rightarrow \alpha$ probíhá při nižší teplotě, v intervalu 500 až 300 °C.

4.2. Metalurgie svaru

Šíření tepla v materiálu lze charakterizovat do tří časových etap:

- interval sycení, tj. etapa vzrůstu teploty
- kvazistacionární stav, tj. etapa ustáleného pohyblivého teplotního pole
- etapa vyrovnávání se teplot v celém objemu svarku po sváření

V tepelně ovlivněné oblasti se maximální teploty svařovacího cyklu snižují z teploty solidu až na teplotu místnosti.

Při svařování nelegovaných a nebo legovaných ocelí s přeměnou $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ můžeme tepelně ovlivněnou oblast rozdělit na následující charakteristické zóny:

- 1) přechodovou zónu, tj. zóna přechodu z tepelně ovlivněné oblasti do svarového spoje.
- 2) Přehřátou zónu, tj. zóna s teplotami ovlivnění nad A3, překračující teplotu intenzivního růstu primárních zrn.
- 3) zóna vyhřátí nad teploty A3, tj. s úplnou polymorfní transformací $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$.
- 4) zóna vyhřátí nad teploty A1, resp. s neúplnou polymorfní strukturou, tj. mezi teplotami A1 až A3.
- 5) Zóna vyhřátí pod teploty A1, tj. taková ve které probíhají změny jen v rámci tuhého roztoku α Fe nebo v substruktuře. [12]

Pozor na šířku zón tepelně ovlivněné oblasti se při rozdílných technologiích svařování mění.



4.3. Deformační cyklus svařování

Deformační cyklus svařování vzniká následkem působení teplotního cyklu. Účinkem teplotní roztažnosti a nestacionárního teplotního pole vznikají v oblasti svarového spoje proměnlivé napětí. Na jejich velikost má také vliv i tuhost upnutí svarového spoje. Nejprve ve svarovém spoji při ohřevu vzniká tlakové napětí. Při dalším vzrůstu teploty pevnost kovu klesá a již nižší napětí nám způsobuje vyšší deformace. Při poklesu teploty se tlakové napětí mění na tahové a v daném místě vzniká tahová deformace. Sledování deformačních procesů v oblasti svarového spoje lze realizovat těžko, průběh napětí můžeme zaznamenat pomocí tenzometrů a můžeme využít prvotní simulace pro svářecí cyklus.

Analýzou deformačních cyklů svařování se dá zjistit, že v oblasti svarového spoje působí tlakové nebo tahové napětí. Působením napětí se lokálně přetváří oblast svarového spoje.

V nejhorším případě může být deformační schopnost oblasti svarového spoje lokálně tak vysoká, že mohou vzniknout trhliny.

Deformační cyklus svařování se vyznačuje tím, že probíhá v každém bodě teplotního cyklu (s výjimkou maximální teploty) a jeho šířka může i několikanásobně převyšovat šířku tepelně ovlivněné oblasti. [12]



5. Konstrukční materiály na bázi slitin Fe – Al

5.1. Úvod intermetalika [14,15,22]

Intermetalické fáze – intermetalické sloučeniny neboli intermetalika – tvoří speciální skupinu materiálů. Z hlediska strukturního jsou to tuhé roztoky nebo sloučeniny, ve kterých jsou jednotlivé atomy pod určitou kritickou hodnotou T_c uspořádány na dlouhou vzdálenost. Většinou existují v relativně úzkém rozmezí koncentrací kolem jednoduchých stechiometrických složení.

Struktura intermetalik souvisí s velmi silnou vazbou mezi nestejnými atomy a odtud vycházejí i mechanické vlastnosti intermetalik.

Jejich tvrdost a vysoká pevnost při vysokých teplotách tvoří z intermetalika slibnou variantu při vývoji nových materiálů pro použití za vysokých teplot.

Od tuhých roztoků s krychlově středěnou mřížkou se odvozují intermetalické fáze. Takovou strukturou jsou např. B2 známá u NiAl a FeAl a dále struktura $D0_3$, jejímž typickým příkladem je Fe_3Al , který je předmětem výzkumu.

Křehkost při běžných teplotách je zatím hlavní závadou při výběru vhodného intermetalika.

Existují hlavně tři důvody příčiny lomu:

- skluzové napětí je velké ve srovnání s lomovým napětím
- nedostatek aktivních skluzových systémů
- malá pevnost podél rozhraní zrn

Malá křehkost souvisí s nežádoucími příměsemi jako S, P, Sn, Sb, které vzhledem ke své vysoké elektronegativitě odčerpávají náboj z kovové vazby na rozhraní a dochází k interkrystalickému lomu. K potlačení tohoto vlivu se používá přídavek boru do 1% at.

Vlastnosti:

a) Intermetalika jsou pevná, jejich pevnost se zvyšující se teplotou neklesá tak rychle jako u běžných slitin.

b) Intermetalika vytvořené různými kombinacemi Al, Ti, Si (aluminidy, titanidy, silicidy) mají nízkou až velmi nízkou hustotu. Tyto materiály mají vysoký měrný modul (E/p), který je mimořádně důležitý pro transportní aplikace (letecká a povrchová doprava) a pro snížení hmotnosti rotujících součástí strojů.



c) Elastické moduly intermetalik jsou samy o sobě vysoké a stejně jako u pevnosti dochází k pomalejšímu poklesu jejich hodnot s teplotou než u neuspořádaných slitin.

d) Intermetalické fáze s vysokým obsahem hliníku mají dobrou odolnost proti oxidaci za vysokých teplot.

e) Díky uspořádané struktuře vznikají intermetalika s výrazně nižšími koeficienty difuze, což se projevují v nižší rychlosti tečení, velmi obtížné rekrytalizaci i ve zvýšené odolnosti proti korozi.

5.2. Užití slitin na bázi aluminidu železa Fe_3Al

Do skupiny slitin železa se v posledních letech řadí nový konstrukční materiál, resp. skupina konstrukčních materiálů : intermetalika, která obsahují vysoké procento (25 – 40 at%) železa.

Nejcharakterističtjším příkladem je Fe_3Al . Jejich použití je předpokládáno zejména v energetice používajících fosilních paliv. Aluminid železa Fe_3Al může být náhradou nerezavějících austenitických ocelí. Aluminidy železa jsou dobře známy pro jejich vynikající odolnost vůči vysokoteplotním sulfidačním a oxidačním prostředím.

Důvodem zájmu o tento materiál jsou podstatné tyto vlastnosti :

- výrazné snížení nákladů na suroviny.
- hodnoty R_p a R_m při vysokých teplotách při zachování tvárnosti.
- již zmíněná dobrá korozní a oxidační odolnost.

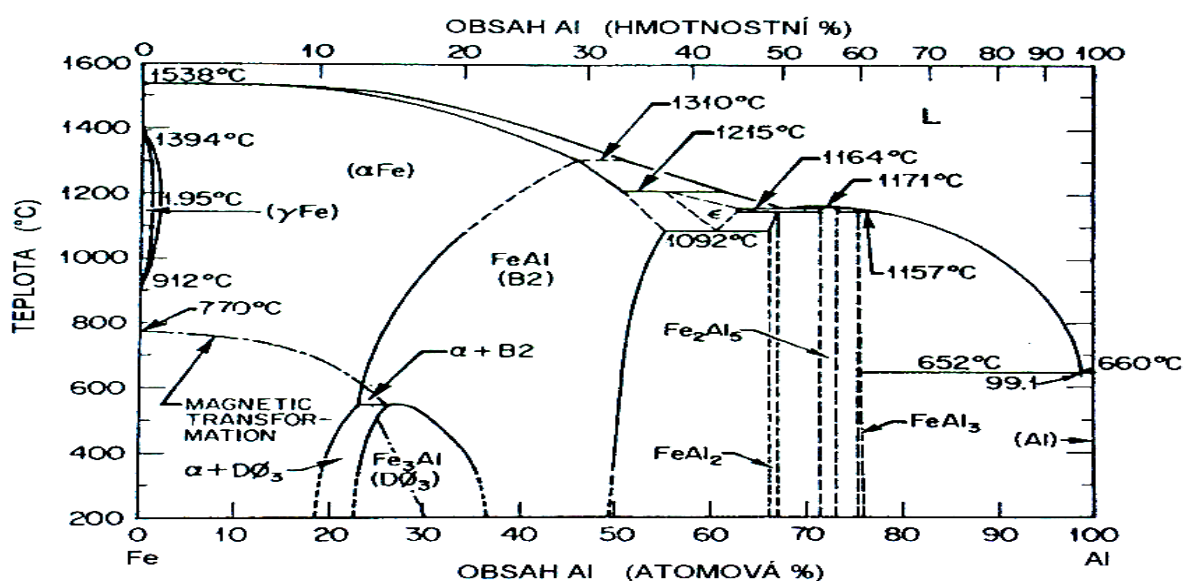
Hlavním problémem aplikací je špatná tvařitelnost při pokojové teplotě a nízká vysokoteplotní pevnost. V poslední době se zkoušelo několik postupů jak zamezit těmto vlivům nebo tyto efekty potlačit. Jako nejúčinnější se prokázalo legování chromem v kombinaci s aditivem TiB_2 , zjemňující zrna. Současně tím byla zlepšena i odolnost materiálu vůči korozní křehkosti (působení vodních par). Další zlepšení tvárnosti aluminidů na bázi Fe_3Al bylo dosaženo zejména vysokým stupněm deformace při 900 – 1000 °C, např. válcování, po němž následovalo nízkoteplotní tepelně-mechanické zpracování, např. válcování a žíhání, v rozmezí teplot 650 – 850 °C. .

V těchto případech je tvárnost podstatně větší než bezprostředně po tváření. Pevnost a mez kluzu po takovém zpracování příliš neklesají a konečným výsledkem je velmi pevný materiál s podstatně zlepšenou tvárností.



Specifické výhody slitin Fe_3Al jsou:

- 1) vynikající odolnost vůči síře
- 2) oxidační odolnost
- 3) nízká měrná hmotnost
- 4) dobrá otěruvzdornost (wear resistance)
- 5) odolnost vůči kavitaci při erozi
- 6) nízká cena materiálu



Obr. 1 Rovnovážný diagram soustavy Fe – Al

Obr. 5.1. Stavový diagram Fe-Al

Výběr postupu tavení pro aluminidy železa je spojen s řadou problémů:

a) Použití vlhké navážky nebo vlhkost v blízkosti tavicího kelímku může mít za následek vznik velkého množství vodíku, který může během tuhnutí uniknout a vznikají velké dutiny. Při tavení na vzduchu se dá vodíková pórovitost odstranit použitím suchých vsázek nebo probubláváním taveniny argonem. Často se používá tavení ve vakuu nebo přetavování ve vakuové obloukové peci. To má ovšem za následek vyšší cenu slitiny.

b) Vznik Fe_3Al ze základních prvků železa a hliníku je exotermická reakce. Konvenční způsob roztavení železa a přidání hliníku způsobuje vzrůst teploty o několik stovek stupňů. To způsobí oxidaci taveniny, prodloužení doby před litím a obtížné nastavení požadovaného složení z důvodu oxidace prvků.



c) Výběr vhodného kelímku pro tavení aluminidů železa je důležitý ze dvou důvodů :

- Minimalizace znečištění kelímkovými materiály
- Dlouhá životnost kelímku

Pro komerční účely se doporučuje kelímek z oxidu hořčíku (MgO). Hliník však může redukovat oxid hořčíku při teplotách blízkých bodu tání aluminidu železa. Tím se do taveniny nabírá hořčík a kelímek také eroduje. Tomu můžeme zabránit tavením v kelímku z Al_2O_3 . Jako desoxidátor se těsně před odlitím přidává hliník, aby se vytvořila tenká vrstva Al_2O_3 , chránící taveninu před oxidací a difuzí atmosferického dusíku do taveniny.

d) Základní složení slitin typu aluminidů železa Fe_3Al tíhnou k tvorbě velkých zrn při lití ingotů a lití do písku. Veliká zrna mají dramatický účinek na tvářitelnost slitin typu Fe_3Al a znemožňují zpracování odlitků za studena. Proto je nezbytné snižovat velikost zrna pomocí očkovacích aditiv (inokulační proces).

V posledních letech se podařilo upravit plasticitu na přijatelné hodnoty a to pomocí odklonu od stechiometrie (28 at.% Al) a jednak použitím ternárních legur, zejména chromu, v kombinaci s aditivem TiB_2 zjemňujícím zrna. Aluminidy železa soutěží s nerezavějícími oceli třídy 300 a 400 a některými niklovými slitinami.

5.2.1. Aplikace slitin Fe_3Al

Na těchto uvedených výhodách jsou založeny některé aplikace, které se pro slitiny typu Fe_3Al očekávají :

- **1) Slinované pórovité (plyno-kovové) filtry v záření pro zplyňování uhlí :** V této aplikaci jsou filtry používány k odstranění určité látky z plynu vznikajícího při zplyňování uhlí a při dalších procesech, kde plyn obsahuje vysoké procento síry. Využívá se výhody sulfidační odolnosti aluminidů železa ve srovnání s jakýmkoliv jiným běžně dostupným materiálem. Filtry se připravují slinováním prášku na zvolenou hodnotu pórovitosti.

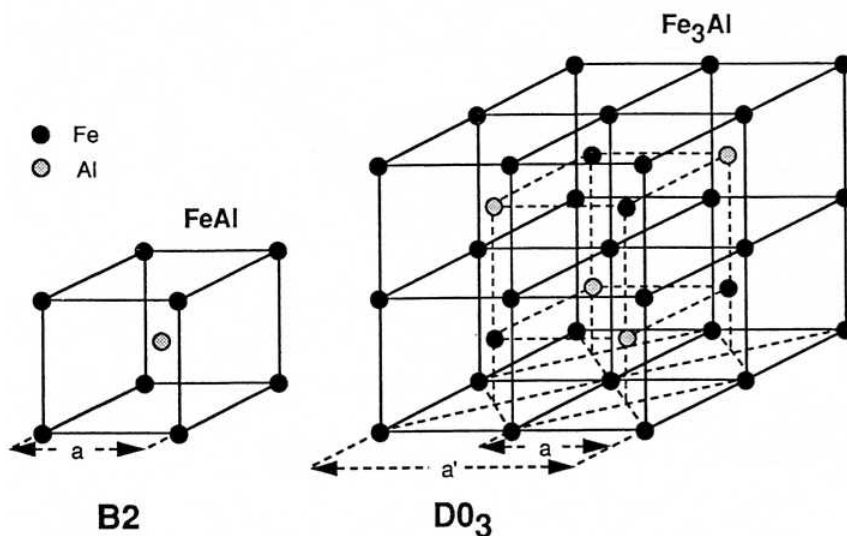
- **2) Topné elementy, ponorné vařiče :** Při této aplikaci se využívají dráty pro topná tělesa v topinkovačích, pecích, a sušičkách. Využívá se vysoké rezisivity, která je konstantní do 1000 °C, a vynikající oxidační odolnosti. Výroba drátů je komplikována omezenou tvářitelností při pokojové teplotě. Tyče válcované za tepla lze použít jako topná tělesa v pecích.



- **3) Součástí pecí :** Využívá se vynikající oxidační odolnosti pro takové komponenty jako retorty, válečky, tyče apod. Předpokládá se výroba různými druhy odlévání.
- **4) Katalytické vrstvy konvertorů:** Využívá se oxidační odolnosti. Folie pro tyto aplikace se vyrábějí především válcováním za tepla s následným válcováním za studena.
- **5) Regenerátorové desky :** Slitina se používá jako výměník tepla v plynové turbíně pro vynikající oxidační sulfidační odolnost. Podmínky při výrobě jsou stejné jako v předešlém případě.
- **6) Součástí pro aplikace v roztavených solích a nádoby pro chemickou výrobu:** Aluminidy železa se výborně snášejí s oksydujícími a uhlíkatými solemi. Možnosti využití se očekávají pro výrobu nádob, transportních a rotujících součástí. Výroba zahrnuje kombinaci lití, zpracování ingotů za tepla a svařování.
- **7) Stínění :** Zejména se předpokládá stínění trubek proti oxidaci v elektrárnách. Typicky se jedná o výstelky trubek tloušťky 3 až 4 mm. Měly by se vyrábět ohýbáním za tepla válcovaných plechů požadované tloušťky.
- **8) Výfukové systémy a jiné součásti benzinových a naftových motorů :** Využívá se jednak odolnosti proti vzniku koroze jako v bodech 2,5,6, navíc je možno využít vzniku dobré difúzní vrstvy mezi aluminidem a součástí motorů z hliníkových slitin.

5.3. Fyzikálně metalurgické poznatky o aluminidu železa Fe_3Al

Fázový diagram $\text{Fe}_3\text{-Al}$ na obr. 5.1. dokládá závislost kritické teploty transformace $\text{D0}_3 \rightarrow \text{B2}$ na obsahu hliníku. Dále je patrné, že právě při stechiometrickém složení Fe_3Al prochází materiál při ohřevu a při ochlazování řadou fázových rozhraní (od nízkých teplot): $\text{D0}_3 \leftrightarrow \text{D0}_3 + \alpha \leftrightarrow \text{B2} + \alpha \leftrightarrow \text{B2} \leftrightarrow \alpha$. Proto se složení slitiny upravuje do nestechiometrického složení Fe-28at.\% Al . To zajišťuje jednoduchou situaci s jediným rozhodujícím fázovým přechodem v pevném stavu $\text{D0}_3 \leftrightarrow \text{B2}$. Jiné základní složení se již nepoužívá a slitina se modifikuje dále jen s dalšími aditivy.



Obr. 5.2. Krystalová struktura B2 a D0₃

Mechanické vlastnosti aluminidů Fe₃Al v závislosti na teplotě měření.

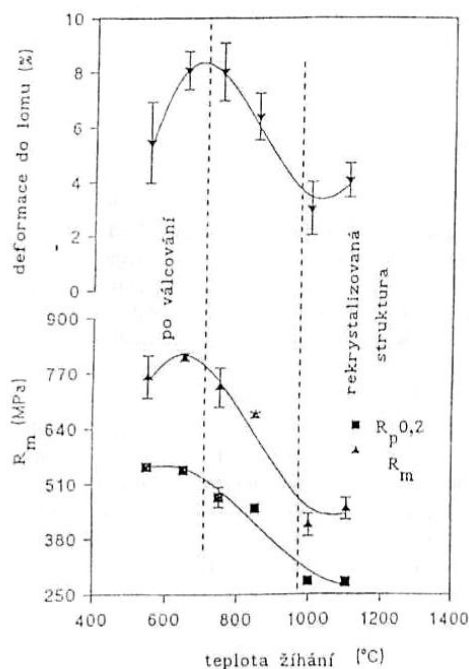
Za nejvhodnější legury se považují chrom a dále pak molybden, zirkon, vanad a niob.

Vliv legování těmito prvky je shrnut v tabulce.5.1.

Tabulka 5.1.

Prvek	Max. množství (at%)	Mikrostruktura	Užitečný vliv
Cr	6	tuhý roztok	plasticita při pokoj. teplotě
Nb	2	precipitát	vysokoteplotní pevnost
Mo	2	tuhý roztok	vysokoteplotní pevnost
Zr	0,2	precipitát	vysokoteplotní pevnost
V	2	tuhý roztok	vysokoteplotní creepová odolnost

V aluminidech Fe₃Al dochází k transformaci D0₃ → B2 při teplotách kolem 530 °C, kdy vznikají vlastnosti tohoto materiálu singularitu (jedinečnosti). Použití tohoto materiálu při teplotách (T >500°C) bude možné, pokud se podaří zvýšit T_c pro přechod D0₃ → B2 pomocí úpravy složení aditivity jako 3 až 10 % Ti, Si, Mo, Mn, Ni. Jako speciální aditiva zjemňující zrna a mající tedy za následek lepší tvárnost (při všech teplotách přicházejících v praxi v úvahu) se používají zejména Ti₂B a v poslední době též Ce.



Obr 5.3. Mez kluzu a deformace do lomu slitiny Fe₃Al při pokojové teplotě předchozího žhání

Tvářením za tepla v oblasti B2 se nastaví určitý stupeň uspořádání, který pak se dále zvyšuje žháním při teplotách vyšších než T_c . Transformace na D03 probíhá sice velmi rychle, ale k jejímu úplnému dokončení je potřeba dlouhodobého žhání při teplotách pod T_c , tedy např. často používané žhání při 500°C. Pokud se takto neunifikuje strukturní stav, zůstává v materiálu určitý objemový zlomek struktury B2. Tento stav (dvofázový materiál B2 + D03) je žádoucí k zachování rozumné hodnoty tvárnosti. K nedostatečné plasticitě aluminidů železa přispívá křehnutí v různých prostředích.

Tvárnost v suchém prostředí, jako je vakuum a suchý kyslík, je podstatně větší než na vzduchu.

Již dříve bylo upozorněno že vlhkost ve vzduchu je zdrojem křehnutí, jehož příčinou je vodík. To se podařilo překonat přidavky chromu.

Představu o vlivu prostředí uvádí tabulka 5.2. :

Tabulka 5.2.

Deformační prostředí	Deformace do lomu (%)	R_m (Mpa)	$R_{p0,2}$ (Mpa)
	při pokojové teplotě		
na vzduchu	4,1	387	559
Ve vakuu $<10^{-4}$ Pa	12,8	387	851
v kyslíku $6,7 \cdot 10^{-4}$ Pa	12	392	867
vodní pára	2,1	387	475



6. Experimentální zařízení – JK 701 :

Laser JK 701 je zařízení, který výkonem patří do třídy 4. Krytováním patří do třídy 1.

Laserové zařízení třídy 1 – laserové zařízení, které nezpůsobí větší ozáření lidské obsluhy než je limit přístupné emise třídy 1 pro použitelné vlnové délky a délku vyzařování viz. ČSN EN 60825.

Laserové zařízení třídy 4 – laserové zařízení, které způsobí větší ozáření lidské obsluhy než je limit přístupné emise pro třídu 3B viz ČSN EN 60825.

6.1. Popis a konstrukce experimentálního zařízení :

Lasery JK 701 se skládají ze tří jednotek :

- zdroj laserového svazku
- napájecí zdroj
- ovládací panel

Napájecí zdroj poskytuje ekletický výkon do zdroje laserového svazku (hlavně do výbojek). Zdroj laserového svazku tvoří světelný výstup v závislosti na vstupu z napájecího zdroje. Napájecí zdroj se také skládá z hadic chladicího systému co chladí jak zdroj laserového svazku tak samotný zdroj. Napájecí zdroj také obsahuje mikroprocesor, který řídí a monitoruje všechny základní funkce.

Ovládací panel je externí a je hlavním komunikačním kanálem s mikroprocesorem. Komunikuje a zobrazuje požadavky obsluhy a odpovědi ze zdroje laserového svazku.

Při požadavcích operátorů, hraje mikroprocesor velmi důležitou roli při monitorování laser systému a detekuje pokud je to nezbytně nutné, zakazuje provedení špatných příkazů. Navíc mikroprocesor vyhodnocuje stav a hlásí varovná hlášení, dále sám upravuje podmínky tak aby se systém nedostal do nebezpečného stavu.

Další možné vybavení laseru JK 701 :

- optika LD rezonátor
- dodávka paprsku pomocí optického vlákna
- obráběcí hlava s binokulárním prohlížečem
- různé výrobní čočky
- čočka tryska sestava
- ruční ovládání clony



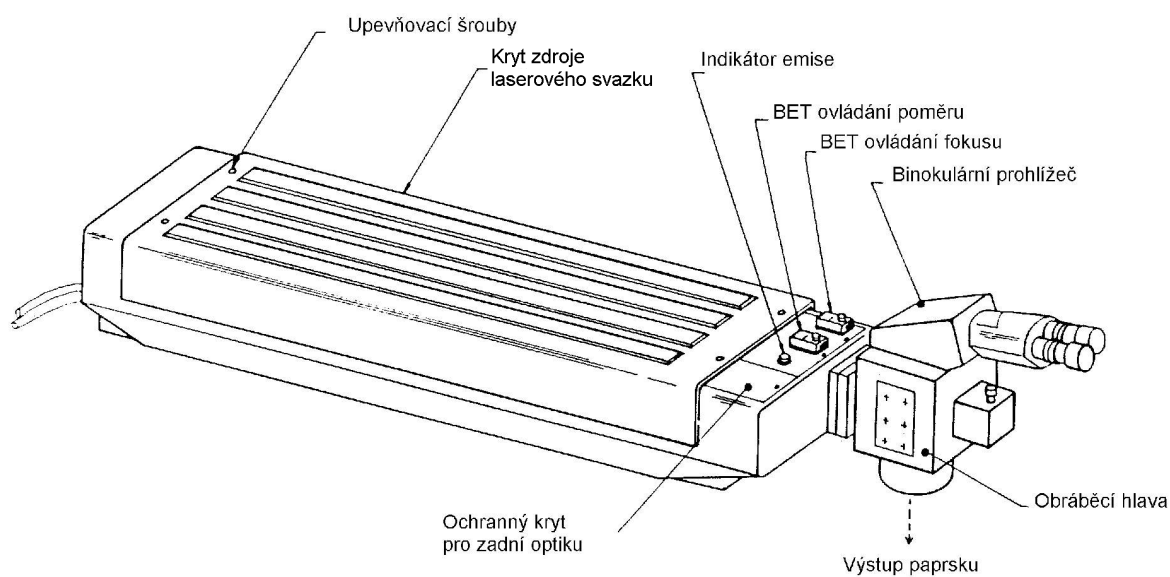
Dále může být dodána bezpečnostní obálka :

- ručně řízené stoly (lineární rotační)
- CNC (na řízení stolů a laseru)
- odsávání
- osvětlení obrobku

6.1.1. Zdroj laserového svazku :

Všeobecný pohled na zdroj laserového svazku je na obr. 6.1. s nápisy, které popisují vnější vlastnosti :

- víko
- dva regulátory pro BET (teleskop pro výstup laserového svazku)
- indikátor emisí
- obráběcí hlava s binokulárním prohlížečem

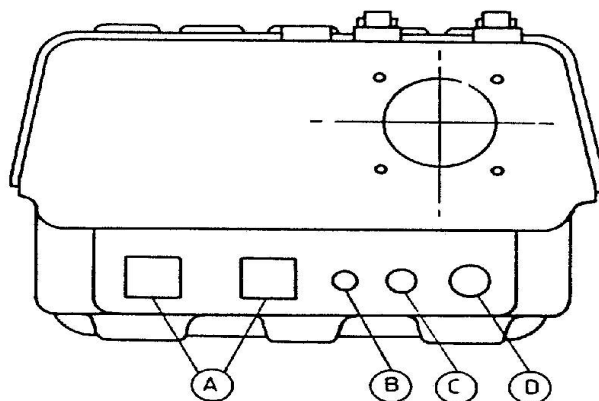


Obr.: 6.1.: Zdroj laserového svazku

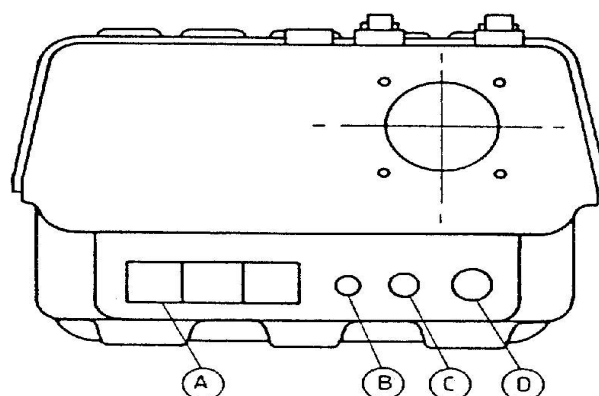


Obr. 6.2. ukazuje pohled z přední strany :

- konektory pomocného zdroje
- konektor pro ruční ovládání clony
- konektor pro ovládací panel



S. AMERIKA



CELOSVĚTOVĚ KROMĚ S. AMERIKY
A - NAPÁJECÍ KONEKTOR PRO PŘÍSLUŠENSTVÍ
B - KONEKTOR CLONY INTERLOK
C - KONEKTOR PRO RUČNÍ OVLÁDÁNÍ CLONY
D - KONEKTOR PRO OVLÁDACÍ PANEL

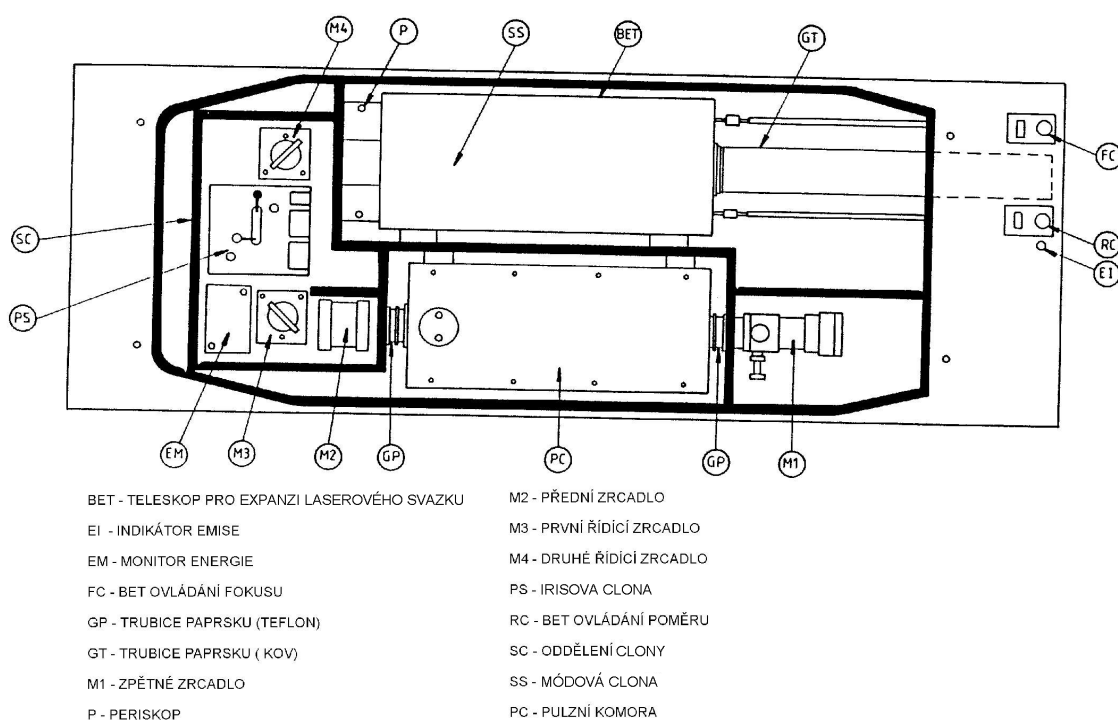
Obr.: 6.2.: Čelní deska zdroje laserového svazku



Zdroj laserového svazku obsahuje :

- pulzní komoru
- optika rezonátoru
- monitorování energie
- dvě zrcadla měnící dráhu paprsku
- výrobní clona s integrovaným pohlcovačem energie
- proměnné zvětšení výstupu laserového svazku (BET)
- módová clona

Obr. 6.3. ukazuje vnitřní pohled na zdroj laserového svazku



Obr.: 6.3.: Umístění komponentů ve zdroji laserového paprsku

Módová clona je umístěna v oddělení BET, přední zrcadlo sestava + obě dvě řídící zrcadla měnící směr laserového svazku + monitor energie + Irisova clona jsou umístěny v oddělení clony.

Cesta laserového svazku ze zdroje laserového svazku až k obrobku je schematicky na obr. 6.4. Všimněme si umístění He – Ne laseru, který je ve skutečnosti umístěn pod laserovým

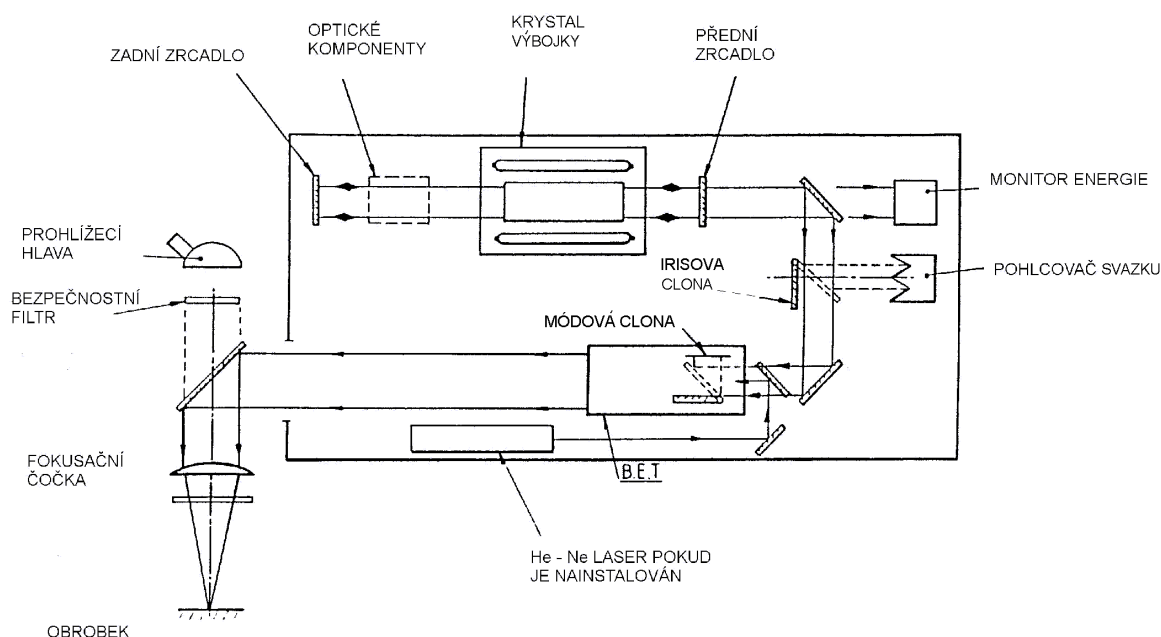


svazkem. Navíc zrcadlo, které zařazuje He – Ne laser do cesty hlavního paprsku, je ve vertikální rovině.

Srdcem laseru je oscilátor, který se skládá z pulzní komory a optiky rezonátoru. Oscilátor generuje pulzní laserový svazek vzhledem k pulsům z napájecího zdroje.

Monitor energie nabízí změřenou hodnotu ovládacímu panelu nebo řídicímu systému. Řídící zrcadla – každé z nich lomí paprsek o 90°. První zrcadlo směřuje paprsek do sestavy Irisovy clony, druhé zrcadlo směřuje paprsek do sestavy BET a módové clony a do výstupu na předním panelu zdroje laserového svazku.

Zdroj laserového svazku má vyztužené dobře přiléhající plastové víko, připevněné čtyřmi šrouby a dosedá na těsnění. A navíc všechny hlavní optické sestavy jsou umístěny v malých boxech a cesta paprsku je úplně uzavřená pomocí trubek.



Obr.: 6.4.: Optická cesta



1) Pulzní komora :

Pulzní komora se skládá z krystalu a dvou lineárních výbojek, každá je na jedné straně krystalu. Primární účel této komory je co nejefektivněji převést světlo z výbojek do krystalu. Pulzní komora se stává z boxu z nerez oceli, který je utěsněn těsněním O - kroužek proti úniku vody, která proudí skrze tuto komoru pro odvedení přebytečného tepla z krystalu.

Výbojky se skládají z tenkostěnných trubek z křemíkového skla utěsněného na obou koncích, naplněné inertním plynem převážně kryptonem. Oba konce obsahují flexibilní část opatřenou konektorem pro zasunutí do protikusu.

Krystal je válcovitého tvaru z krystalického Nd^{3+} : YAG s velmi jemně broušenými plochami, kde je dodržena extrémní geometrická přesnost, každá plocha má antireflexní povlak. Koncové plochy jsou velmi kritická místa a proto musí být manipulace jen s extrémní pozorností.

Pro lepší spojení světla z výbojek do krystalu pulzní komora obsahuje dvě keramické desky. Jedna je umístěna na krytu a druhá na bloku. Po smontování tvoří komoru, kde je krystal a výbojka.

Pro zvýšení účinnosti chlazení je krystal umístěn ve skleněné trubici, která mimo jiné chrání krystal před nebezpečným UV zářením od výbojek. Chladicí voda vstupuje do této trubice ze spodu z bloku potrubím. Po projití kolem krystalu vysokou rychlostí dále putuje do pulzní komory pomocí potrubí. Odtud proudí opačným směrem do chladí výbojky a odchází únikovým otvorem. Před tímto otvorem je umístěné jemné sítko zabráňující úniku drobných částíček skla při prasknutí výbojky do chladicího okruhu.

Krystal je držen v trubici potrubím pomocí O - kroužkového těsnění, které je pod tlakem od kroužků krystalu, které přesahují pulzní komoru, kde jsou opět upevněny pomocí O - kroužkového těsnění. Tlačící kroužky umožňují volný přístup vody a také volný prostup světla krystalem. Tato metoda upevnění obvykle vystavuje oba konce (čela) laserového krystalu kontrole a čištění, pokud držící kroužky odstraníme.

Za pulzní komorou je mezideska, kde jsou příruby od napájecího zdroje – napájení lamp a hadice s vodou – ukončení. Dvě hadice chladicí vody jsou zakončeny a připevněny na zadní blok potrubí. Voda jde skrze potrubí v mezidesce a pokračuje do vstupního portu v pulzní komoře. Vše je utěsněno O - kroužky.

Čtyři vodiče vedou k výbojkám, končí na jedné straně mezidesky zdroje laserového svazku a pokračují k druhé mezidesce, zde ústí v pulzní komoře skrze další mezidesku. Vše je přetěsněno pomocí O - kroužků. V pulzní komoře jsou kolíky s vybráním jak v bloku tak ve víku, které slouží k umístění výbojek jak horizontálním tak vertikálním směru.



Pulzní komora je připevněna na mezidesce pomocí šesti šroubů M4. Kombinovaná sestava blok - mezideska je upevněna ve zdroji laserového svazku třemi ukončenými šrouby M4 umístěných v izolovaných vložkách, které přesahují blok a mezidesku. Umístění bloku ve správné výšce ve zdroji laserového svazku je pomocí třech vyztužených podložek, které dosedávají na obrobené plochy boxu zdroje paprsku a ty jsou umístěny v izolovaných vložkách, které přímo sedí na spodku bloku. Podložky jsou drženy pomocí O - kroužků, které jsou chycené mezi blokem a mezideskou.

2) Optika rezonátoru :

a) Standardní rezonátor :

Standardní rezonátor se skládá ze dvou zrcadel umístěných na každé straně laserového krystalu. Zadní zrcadlo M_1 , je totálně nepropustné, umístěné v sestavě, která umožňuje naklánění pomocí knoflíků na vrchní a boční straně. Přední zrcadlo M_2 je částečně propustné. Je umístěno v přesně obrobené buňce a nabarvené stříbrnou barvou.

Obě dvě zrcadla jsou upevněny vzhledem k přesně obrobeným plochám pružinovými držáky. A to je velká výhoda přesně obrobených ploch, protože je optika předem geometricky vyrovnaná. Po zasazení všech buněk s optikou je nastartován paprsek, výstupní výkon se projeví okamžitě a stačí jen doladit zadní zrcadlo. Standardní rezonátor dává největší výstupní výkon a je trvale používán pro svařování.

b) LD rezonátory :

Aplikace jako je řezání a vrtání děr potřebují větší teplotu než svařování. Tyto aplikace těžší z vysoké hustoty výkonu paprsku na obrobek. Hustota výkonu je termín, který znamená množství pulzní energie za milisekundu, která je dopravena na každý čtverečný milimetr materiálu obrobku v místě fokusu. Je jedna principiální metoda jak toho dosáhnout a to zmenšení průměru paprsku (bodu na materiálu). Jedna metoda je užívat menší fokusační vzdálenost pracovní čočky. A druhá metoda je úprava laserového rezonátoru pro snížení rozptylu.

LD sada obsahuje jak pro LD_1 tak pro LD_2 :

- jednu čočku sestavy pro každý rezonátor
- několik kovových trubek
- několik teflonových adaptérů
- extra pružinové úchyty a šrouby
- extra sestava výstupního zrcadla (černá)



Sestavy komponentů rezonátoru jsou obarvené pro snadnou identifikaci. LD rezonátory užívají černou sestavu výstupního zrcadla, kde standardní zrcadlo je stříbrné. Standardní zadní zrcadlo M_1 je také použito u LD rezonátorů. Pro změnu pozice M_1 musí být přemístěn klip pro každý rezonátor jinak. Extra klip je třeba pro sestavu čočky u LD rezonátoru, který je umístěn dle konfigurace LD.

Jednotka s čočkami u LD rezonátoru vyžaduje chlazení. Vodou chlazený blok je určený k těmto účelům. Pokud je jednotka používaná blok je připevněn na jednotce. Pokud jednotka není používaná, blok je při pevně do parkovacího bloku.

LD jednotky jsou dodány se skladovacím kufrem a každý komponent má ochranný kryt proti prachu.

c) Řídící zrcadla paprsku :

K tomu aby paprsek prošel všemi komponenty ve zdroji paprsku slouží řídící zrcadla M_3 a M_4 . (viz obr. 6.3. a 6.4.). Zrcadlo M_3 je přilehlé k přednímu zrcadlu rezonátoru a M_4 je přilehlé k BET. Zrcadlo M_3 je částečně propustné, ale převážnou většinu laserového svazku odráží na M_4 . Zbytek propuštěného laserového svazku slouží k měření energie. A následně M_4 je nepropustné a odráží všechny laserový svazek směrem na BET a módovou clonu.

Obě dvě zrcadla jsou umístěna na stabilní vyrovnané základně, která dovoluje snadnou výměnu pokud je požadováno, bez potřeby dalšího vyrovnaní. Každá základna je vyrovnaná tak, aby směřovala laserový paprsek podél a do osy BET a dále ven z čelního panelu.

d) Irisova clona :

Irisova clona je umístěna mezi řídícími zrcadly M_3 a M_4 . Účel je zamezit výstupu laserového svazku pokud je požadováno přesto, že výbojky jsou napájeny. Pokud je výstup laserového svazku požadován, clona je otevřena.

Sestava clony se skládá ze zrcadla připevněného na rychlém rotačním solenoidu, vodou chlazeném pohlcovači laserového svazku a několika bezpečnostních komponentů. Nepropustné zrcadlo je umístěné na konzole a na hřídeli solenoidu . Pokud je napájený solenoid, zrcadlo je mimo laserový svazek – otevřená pozice. Následně po přerušení napájení, pružina vrátí zrcadlo zpět do cesty laserového svazku. V této zavřené pozici je laserový svazek odrážen do pohlcovače laserového svazku.

Pohlcovač laserového svazku se skládá s buňky která je naplněna vodou se skleněným okénkem povlakovaným AR. Paprsek projde okénkem a energie je absorbována kovovými stěnami. Absorpce je podporovaná kovovým kolíkem umístěným na zadní straně pohlcovače. Buňka je chlazená vodou z vodního konektoru umístěného na horní straně pulzní komory.



Pro ochranu selhání clony obsahuje clona několik bezpečnostních prvků. Dva senzory jsou zde umístěny, pro sledování uzavřené a otevřené polohy. A neustále je zjišťována odchylka mezi požadavkem a skutečnou polohou. To eliminuje možnost práce s clonou v mezipoloze zaseknutým.

Navíc je instalována přímo nad zrcadlem clony tepelná pojistka, pro zajištění rychlé detekce pokud zrcadlo zkolabuje. Následně teplo od zrcadla otevře okruh pojistky. Obě dvě věci, tepelná pojistka a snímání pozice, jsou napojeny na interlokový okruh skrze desky umístěné v zadní části zdroje laserového svazku. To znamená, že laser je okamžitě deaktivován pokud se objeví problém se clonou.

e) Expandování laserového svazku – teleskop (BET, upcollimator) :

BET je umístěný blízko zrcadla M₄. Hlavní účel je zvětšení průměru laserového svazku, protože následek toho je snížení rozptylu divergence a následně bodu na obrobku.

Průměr laserového svazku x divergence paprsku = konstanta (při konstantním výkonu). A další funkce BET je kompenzovat rozdíly mezi fokusační vzdáleností pro viditelné světlo a pro světlo vlnové délky laseru. Malá korekce nastavení BET zajistí to, že fokus laserového svazku bude stejný jako fokus skrze prohlížeč optiku.

BET je složen ze tří čoček. A paprsek prochází následovně :

- negativní vstupní čočkou, která rozbíhá laserový svazek
- pozitivní čočkou (čočka poměru), která sbíhá laserový svazek
- další negativní čočka (čočka fokusu), která rekolimuje laserový svazek (dělá ho paralelním)

Vstupní čočka je upevněná ve vstupní stěně BET. Poměrová a fokusační čočka se může pohybovat paralelně s paprskem. Navíc je možné sledovat nastavení pomocí ukazatelů. Nastavení je pomocí dlouhých šroubů a převodů. Ovládací knoflíky jsou označeny RATIO a FOCUS. První se nastavuje RATIO. FOKUS se nastavuje pro rekolimování paprsku až po nastavení RATIO. Nastavení každého prvku ovlivňuje nastavení druhého.

f) Módová clona :

Sestava módové clony je umístěná na spodní straně víka BET. To splňuje požadavky zákona pro zastavení laserového svazku - to znamená fyzické zastavení laserového výstupu.

Clona se skládá z robustní kovové desky pevně připojené na hřídel 45° solenoidu. Pokud je napájen solenoid, clona je otevřená a deska je odkloněná mimo laserový svazek.



Pokud solenoid přestane být napájen, tak pružina vrátí zpět kovovou desku zpět do cesty laserového svazku a svazek zastaví – clona zavřena.

Pokud je zavřená Irisova clona je vše zabezpečeno elektronicky tak, že je uzavřená i módová clona viz. obr. (6.3). Ale pokud se pokazí Irisova clona potom laserový svazek dosáhne módové clony a laserový svazek je odražen na keramickou desku, která laserový svazek zastaví a termální pojistku, což zapříčiní rozbití pojistky. Tím je termální pojistka zapojená na interlokový okruh a ten zastaví laser. Zavření závěrky je potvrzeno pomocí senzoru.

6.1.2. Napájení – zdroj :

Největší zařízení je hlavní zdroj, který je robustní a utěsněný. Skříň obsahuje zdroj, chladicí systém a mikroprocesor. Zdroj poskytuje servis pro zdroj paprsku, pro jeho pracovní činnost. Vysoký zdroj pro řízení výkonu do výbojek. Chladicí systém zbavuje přebytek tepla ze zdroje laserového svazku a ze skříně. Chladicí systém se skládá ze dvou částí, vzduchový chladič, který chladí skříň se zdrojem a vodní chladič, který chladí zdroj laserového svazku. Manuální a dálkové ovládání je zajištěno pomocí mikroprocesoru, který řídí chlazení, elektriku, a funkce zdroje laserového svazku.

Hlavní vypínač je zapnutý pokud je v horní poloze. A opačně, pokud je v dolní poloze je vypnutý a ručka se jeví černá. A je ho možné zamknout v poloze vypnuto při práci na vysokém napětí.

Vstupní 3 - fázový napájecí proud prochází přes hlavní vypínač a modul distribuce elektřiny obsahuje pojistky a pomocné zdroje. Výkon do výbojek prochází přes identické, ale nezávislé výkonové moduly. Kde každý výkonový modul se skládá z transformátorového modulu, pulzního modulu a výstupního modulu.

Chladicí systém je umístěn na spodu zdroje - vzduchový chladicí modul (ACM) oddíl 1 a vodou chlazený modul oddíl 2. Tyto moduly jsou izolovány pomocí mezistěny. Chladicí vzduch je veden pomocí potrubí za elektrickými moduly. Po projití mezi moduly se vzduch vrátí skrze mezistěnu.

Po otevření panelu po pravé straně je možno vidět panel s konektory a zakončením, kde je vstup pro vodu a elektřinu, dále vstupy a výstupy pro zdroj laserového svazku a konektory pro ovládací panel a pomocné výstupy. Otvírání tohoto krytu je časté pouze pro servisní zákroky.



6.1.3. Chladicí systém :

Chladicí systém se skládá z ACM, který ovládá chladicí vzduch ve skříni napájecího zdroje a WCM, který řídí chladicí vodu do zdroje laserového svazku. Oba dva transferují zbytkové teplo do externího vodního chlazení.

a) Vzduchový chladicí modul :

Chladicí systém se skládá z výkonného tangenciálního větráku a z termostatického ventilu a výměníku vzduch – voda. Ventilátor pracuje kontinuálně, vzduch cirkuluje kolem modulů pomocí potrubí. Vzduch se vrací na ventilátor skrze výměník, kde se přebytečné teplo předá vodě. Proudění vody je automaticky regulováno pomocí termostatického ventilu, pro udržení konstantní teploty.

b) Vodní chladicí modul :

WCM primárně chladí výbojky a krystal v pulzní komoře. Také chladí výrobní clona – pohlcovač paprsku a vodní systém na chlazení rezonátoru.

Obsah WCM :

- čerpadlo
- výměnná deionizační jednotka
- jednotka s výměnným filtrem
- výměník voda – voda
- termostatický vodní ventil
- zásobník

Čerpadlo čerpá deionizovanou vodu ze zásobníku do zdroje laserového svazku pomocí připojených hadic. Převážná většina proudu se vrací do zásobníku skrze senzor průtoku a tepelný výměník. Malá část se vrací zvláštní hadicí, která vede z vrchní části pulzní komory. Toto řešení zajišťuje odstranění vzduchu z pulzní komory např. po výměně výbojek.

Tepelný výměník zajišťuje předání tepla externí chladicí vodě. Průtok externí vody reguluje automaticky termostatický ventil. Dále k senzoru průtoku je umístěný v chladícím okruhu laseru senzor teploty, vypínač při přehřátí a vypínač při nedostatku vody.



6.1.4. Ovládací panel :

Řídící panel je připevněn přímo do zdroje paprsku pomocí flexibilního vedení, které je připojeno pomocí rozpojitelných konektorů na obou koncích.

6.2. Parametry laseru JK 701 :

6.2.1. Hmotnosti zařízení :

<i>Zdroj laserového svazku:</i>	40 kg
Zdroj :	600 kg
Ovládací panel :	2 kg

6.2.2. Rozměry zařízení :

Zdroj laserového svazku :	délka = 953 mm
	šířka = 280 mm
	výška = 222 mm
Napájecí zdroj :	výška = 1600 mm
	šířka = 1400 mm
	hloubka = 680 mm
Ovládací panel :	šířka = 357 mm
	výška = 230 mm
	hloubka = 110 mm



6.2.3. Rozsah parametrů :

Rozsah parametrů pro různé typy rezonátorů :

	SVAŘOVÁNÍ	LD₁	LD₂
Průměrný výkon	(0 - 550) W	170 W – fixovaný	275 W - fixovaný
Energie pulsu	(0,1 - 70) J	(0,3 - 15) J	(0,5 - 20) J
Šířka pulsu	(0,5 - 20) ms	(0,5 - 5) ms	(0,5 - 5) ms
Frekvence	(0,2 - 500) Hz	(11 – 200) Hz	(13 - 200) Hz

LD rezonátory jsou laděny a dávají fixovaný průměrný výstupní výkon.
Průměrný výkon je zmenšený v závislosti na pracovním cyklu.

6.3. Provoz a seřizování :

Kvůli stárnutí výbojek je potřeba zvyšovat Height požadavek, ale aby se nemusel zvyšovat u každého programu. Je vhodné tuto korekci provést přes I_{\max} a I_{\min} . Stárnutí výbojek je funkce převážně závislá na provozních parametrech – hlavně parametru Height.

Je velmi doporučeno nastavit typickou životnost (Shot Count) pro výbojky na vybrané provozní parametry, potom mohou být výbojky vyměněny před jejich selháním (např. prasknutí). Náhrada neporušené výbojky je snadnější činnost.

6.4. Nastavení standardního rezonátoru :

Tato činnost není vhodná pro LD rezonátory.

Postup :

1. Vyber jednosektorový tvrz pulsu
2. Nastav FREKVENCE 10 Hz
 LENGTH 4 ms
 HEIGHT 0 %
 TRIGGER mode internal

3. Nastav Energy Monitor – na vrchní řádek display na požadovaný rozsah SHAPE / P₄, na spodní řádek v SET modu (např. I_{\min}).



4. Nastartuj laser, před tím než stiskneš LOCAL, ujisti se zda svítí tlač. shutter closed indikátor a další bezpečnost. Ujisti se že bezpečnostní clona (shutter interlock korektor je rozpojen). Jinak musíš nosit bezpečnostní brýle.

5. Zvyšuj I_{\min} v malých přírůstcích dokud výstupní energie (výkon) je zaregistrován. Potom sniž I_{\min} tak, aby právě výstup se přehoupl na nulu.

6. Nastav height na 100%

7. Nastav Energy Monitor na vrchní řádku a požadovaný Range na spodní řádku displeje. Stiskni SET tlačítko 2x pro zobrazení I_{\max} .

8. Výstupní energie by měla být 20J (JK 701), 14J (JK 702). Když výstupní energie je právě pod tyto hodnoty propad může být upraven pomocí I_{\max} (krok 10).

9. Zvyšuj I_{\max} dokud výstupní energie je 20J (JK 701), 14J (JK 702)

10. Stiskni LAMP POWER pro zjištění nových hodnot pro výkon výbojek P_1 a P_2 . Tyto hodnoty budou větší než počáteční.



Obr 6.5. Experimentální zařízení : laser JK 701

Informace k laseru JK 701 [23]



7. Experimentální část

7.1. Návrh a realizace experimentálního programu.

Pro posouzení vlivu teplotních a deformačních účinku na aluminid Fe_3Al bylo dodáno celkem 15 vzorků o velikosti 20 x 20 x 4,5 mm.

Z kapilárních zkoušek před experimentem jsou viditelné poruchy materiálu na vzorku č.3. Vzhledem ke stavu povrchu se lze domnívat že tyto vady vznikly již ve fázi výroby při vyšší teplotě.

Tento vzorek nebyl pro experiment použit. Dále pak nebyly použity vzorky č. 16, 17, 18.

Materiál byl obroušen na magnetické brusce na lesklý povrch. Vzorky byly obroušeny tak, aby došlo co k nejmenšímu tepelnému ovlivnění. Vzorky bylo možno, po ukončení broušení volně držet v ruce.

Významným technologickým parametrem, který ovlivňuje výskyt trhlin ve svarových spojích a v místech nátavu je teplota předehřevu $T_{\text{př}}$.

Vzorky byly rozděleny do dvou skupin po šesti kusech a to :

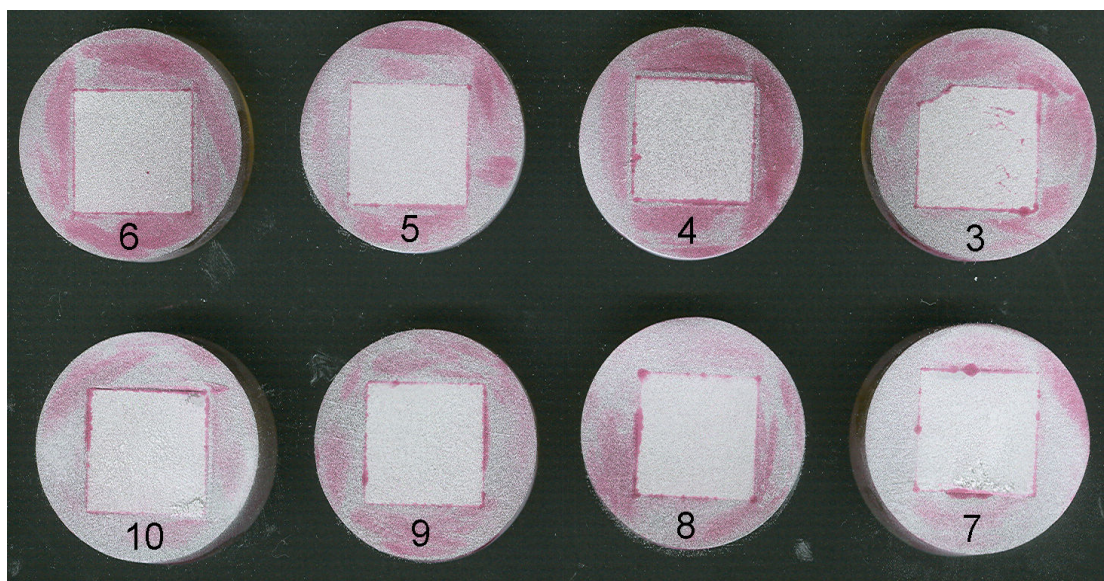
- bez předehřevu ... vzorky č. 4, 5, 6, 7, 8, 9
- s předehřevem ... vzorky č. 10, 11, 12, 13, 14, 15

Pec se vzorky na předehřev byla umístěna od laseru na vzdálenost 10 metrů. Čas od vyjmutí z pece na šamotovou desku a začátek působení laserového paprsku na materiál nepřekročil dobu 10 vteřin.

Vzorky natavovány bez předehřevu byly po uskutečnění nátavu ponechány volnému chladnutí na vzduchu. Během experimentu byly vzorky umístěny na šamotovou desku pojezdového stolu laseru po dobu působení paprsku. Teplota v místnosti byla 24°C.

Vzorky s předehřevem byly umístěny do pece předehřátou na teplotu 400 °C, po dosažení této teploty byly vzorky ponechány v peci dalších 20 minut pro vyrovnání teplot. Vzorky během nátavu byly umístěny opět na šamotové desce pojezdového stolu laseru JK701. Po provedení nátavu se vzorky umístily zpět do pece, předehřáté na teplotu 700°C. Na této teplotě byly vzorky ponechány 1 hodiny a posléze ponechány volnému chladnutí v peci. Dohřev na tuto teplotu má za úkol snížit zbytková napětí v nátavu.

Snímky byly pořízeny na metalografickém mikroskopu Neochot 21 v šikmém osvětlení, pro zvýraznění reliéfu.



Obr. 7.1. Vzorky pro experimentální nátav (vzorky č.3 - č.10) – kapilární zkoušky
Měřítko 1:1



Obr.7.2. Vzorky pro experimentální nátav (vzorky č.11 – č.18) – kapilární zkoušky
Měřítko 1:1

V případě nátavů nebyly žádným způsobem specifikovány konstrukční parametry dílů pro hodnotící kritéria kvality nátavu. Při zkouškách se hodnotilo především vliv deformačních účinků na chování materiálu za různé teploty a různých parametrů laseru.



Hodnocení nátavu dodaného základního materiálu bylo zaměřeno na technologii laserového svařovacího procesu.

Testování všech variant faktorů ovlivňujících svařitelnost a nátav by představovalo neúměrné množství experimentálních zkoušek a neúměrnou spotřebu materiálu. Proto byly testovány pouze kombinace různých faktorů, u kterých se dá předpokládat významný vliv na výsledek natavovacího procesu.

Přehled parametrů, za kterých byly nátavy realizovány jsou uvedeny v tabulce č. 7.1.

Tabulka č. 7.1.

Číslo experimentu	Vzorek	Nastavované hodnoty	
1	4	Frekvence	10 Hz
		Výkon	202 W
		Energie	20,2 J
		Výška pulsu	78 %
		Šířka pulsu	4 ms
		Ohnisko	0 mm
		Čočka	200
		Čas	30 s
2	5	Frekvence	10 Hz
		Výkon	202 W
		Energie	20,2 J
		Výška pulsu	78 %
		Šířka pulsu	4 ms
		Ohnisko	+20 mm
		Čočka	200
		Čas	30 s
3	6	Frekvence	10 Hz
		Výkon	202 W
		Energie	20,2 J
		Výška pulsu	78 %
		Šířka pulsu	4 ms
		Ohnisko	+30 mm
		Čočka	200
		Čas	30 s
4	9	Frekvence	10 Hz
		Výkon	100 W
		Energie	10 J
		Výška pulsu	59 %
		Šířka pulsu	4 ms
		Ohnisko	0 mm
		Čočka	200
		Čas	30 s



Číslo experimentu	Vzorek	Nastavované hodnoty	
5	7	Frekvence	10 Hz
		Výkon	100 W
		Energie	10 J
		Výška pulsu	59 %
		Šířka pulsu	4 ms
		Ohnisko	+20 mm
		Čočka	200
		Čas	30 s
6	8	Frekvence	10 Hz
		Výkon	100 W
		Energie	10 J
		Výška pulsu	59 %
		Šířka pulsu	4 ms
		Ohnisko	+30 mm
		Čočka	200
		Čas	30 s
7	10	Frekvence	10 Hz
		Výkon	202 W
		Energie	20,2 J
		Výška pulsu	78 %
		Šířka pulsu	4 ms
		Ohnisko	0 mm
		Čočka	200
		Čas	30 s
8	11	Frekvence	10 Hz
		Výkon	202 W
		Energie	20,2 J
		Výška pulsu	78 %
		Šířka pulsu	4 ms
		Ohnisko	+20 mm
		Čočka	200
		Čas	30 s
9	12	Frekvence	10 Hz
		Výkon	202 W
		Energie	20,2 J
		Výška pulsu	78 %
		Šířka pulsu	4 ms
		Ohnisko	+30 mm
		Čočka	200
		Čas	30 s



Číslo experimentu	Vzorek	Nastavované hodnoty	
10	13		
		Frekvence	10 Hz
		Výkon	100 W
		Energie	10 J
		Výška pulsu	59 %
		Šířka pulsu	4 ms
		Ohnisko	0 mm
		Čočka	200
		Čas	30 s
11	14	Frekvence	10 Hz
		Výkon	100 W
		Energie	10 J
		Výška pulsu	59 %
		Šířka pulsu	4 ms
		Ohnisko	+20 mm
		Čočka	200
		Čas	30 s
12	15	Frekvence	10 Hz
		Výkon	100 W
		Energie	10 J
		Výška pulsu	59 %
		Šířka pulsu	4 ms
		Ohnisko	+30 mm
		Čočka	200
		Čas	30 s



7.2. Vyhodnocení realizovaných experimentů.

Pro vyhodnocení experimentů byly zvoleny obvyklé postupy používané při vývoji technologie svařování. K posuzování nátavu základního materiálu se v praxi aplikují především kritéria celistvosti a kritéria vlastnosti svarů.

Pro kvalitní svar se vždy pokládá výskyt trhlin za nepřístupný. Další kritéria hodnocení vycházejí z požadavku na provoz svarků, např. mechanické vlastnosti svarových spojů.

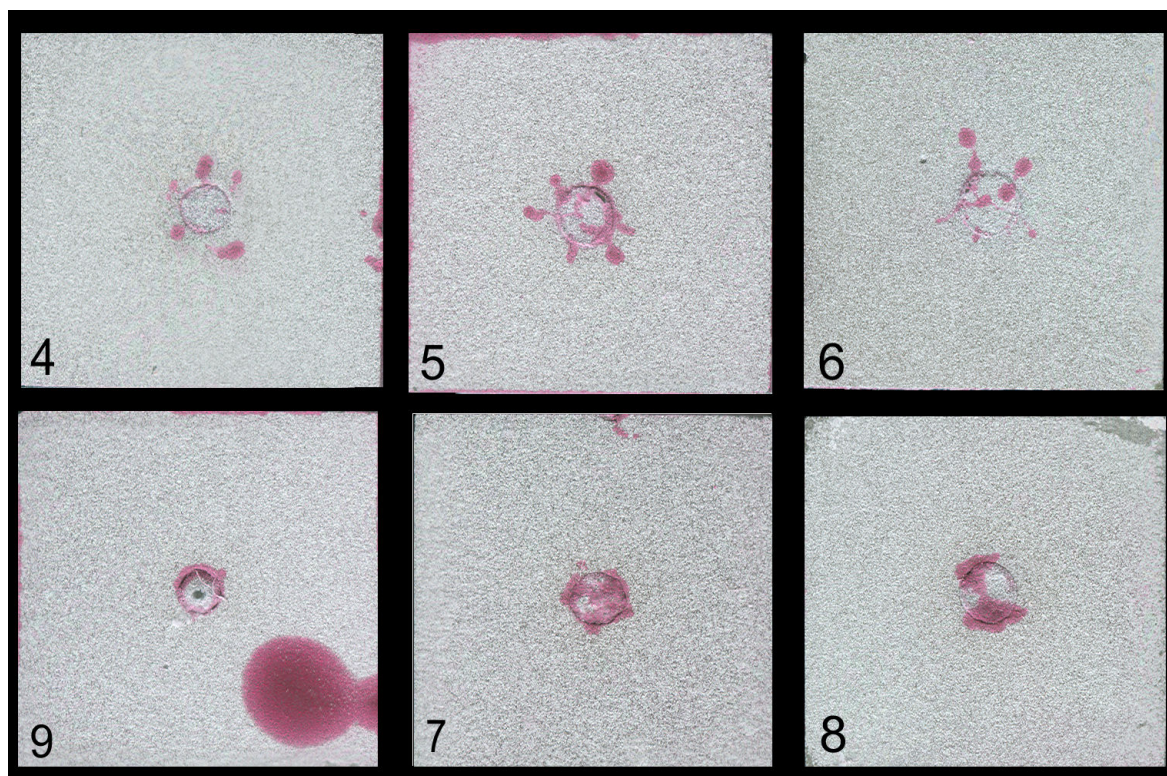
S ohledem na množství provedených zkoušek byla pozornost při hodnocení výsledků zkoušek zaměřena na :

- kontrolu chování základního materiálu během vytváření jednotlivých nátavů,
- vizuální kontrola nátavů po vychladnutí vzorků,
- metalografický rozbor nátavu u jednotlivých vzorků,

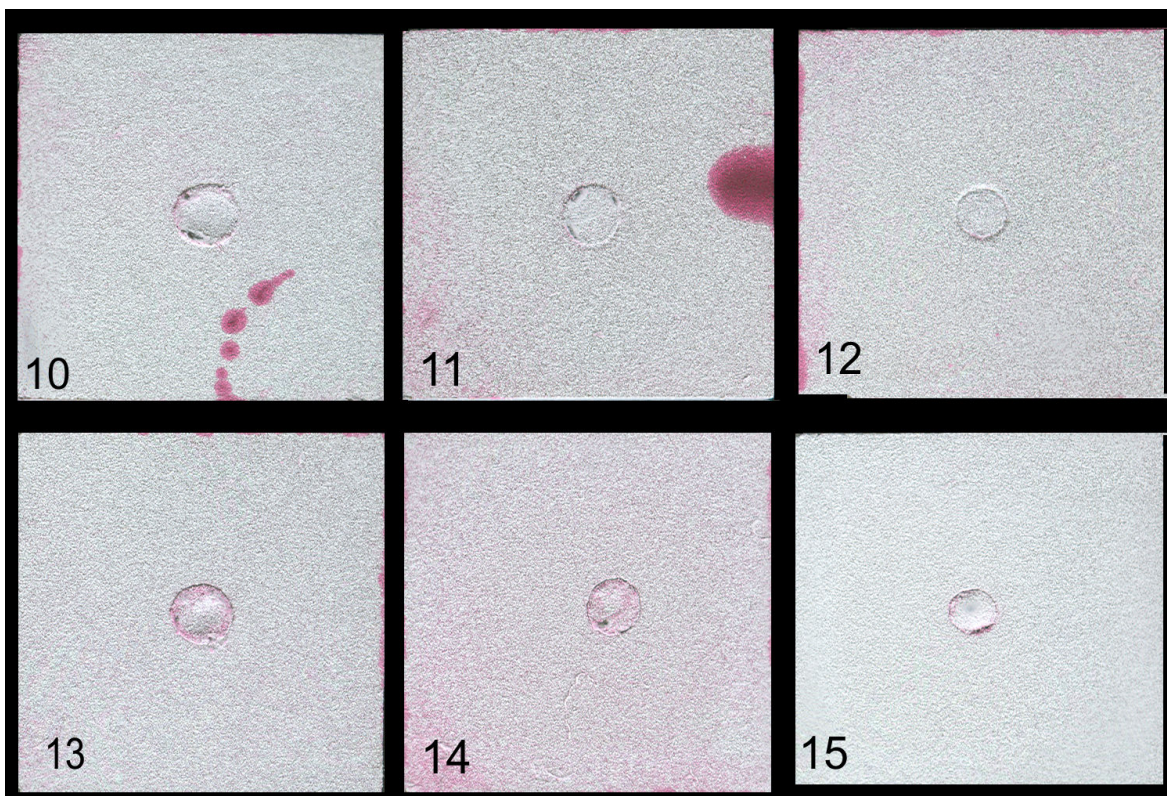
Při přípravě vzorků před provedením nátavů byla plocha celého vzorku upravena na hladký povrch v souladu s ob 7.1. a 7.2. .

U vzorků natavovaných s předehřevem na $T_{př} = 400\text{ °C}$ vznikalo v období po provedení nátavů podstatně menší množství trhlin. Trhliny začali vznikat zejména v době chladnutí vzorků. Vzhledem k charakteru vzniklých trhlin nebyly posuzovány trhliny v okolí nátavu, ale vyhodnocení množství příčných trhlin v nátavu z metalografického výbrusu.

Pro posouzení charakteru struktury a povrchu nátavu jsou dále uvedeny snímky, které dávají možnost posoudit vliv natavovacího procesu na základní materiál. Na Obr. XXa je vidět povrch a struktura nátavu daného vzorku a na Obr XXb je vidět makrostruktura nátavu po metalografickém výbrusu.



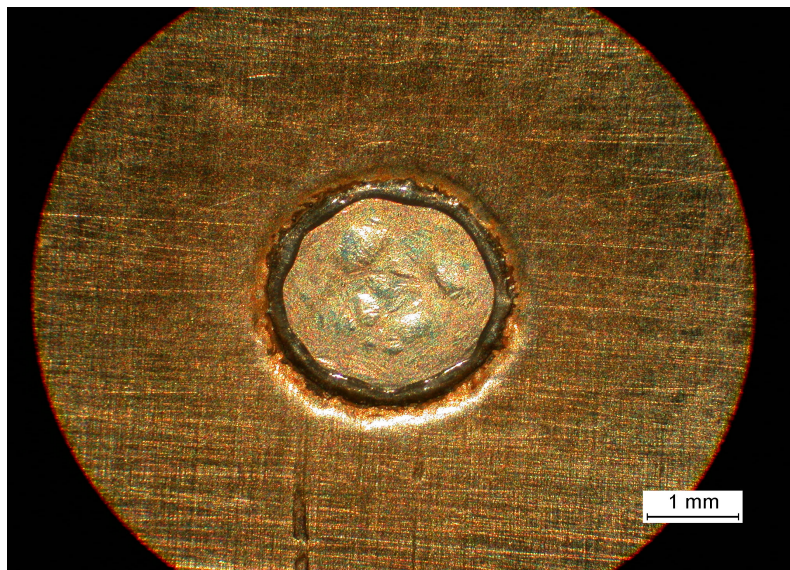
Obr. 7.2.1. Kapilární zkoušky vzorků č.4 – č.9, měřítko 1:2



Obr. 7.2.2. Kapilární zkoušky vzorků č.10 – č.15, přehřev na 400°C,



Vzorek č.4



Obr.7.2.3.a. Makroskopický snímek nátavu vzorku č.4,
pokus č.1

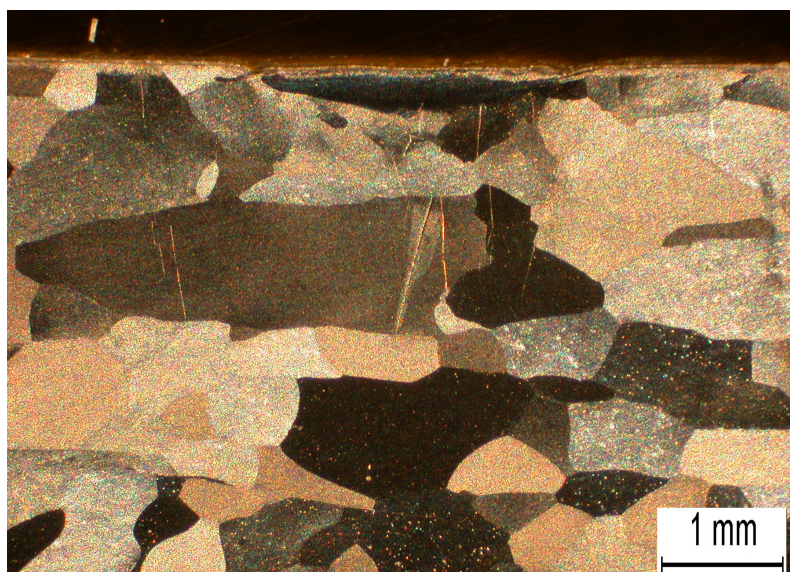
Snímek povrchu nátavu z experimentu č. 1, bez předehřevu.

V okolí nátavu jsou zjevné trhliny.

Průměr nátavu je 2,65 mm.

Trhliny dosahují hloubky 2 mm do materiálu.

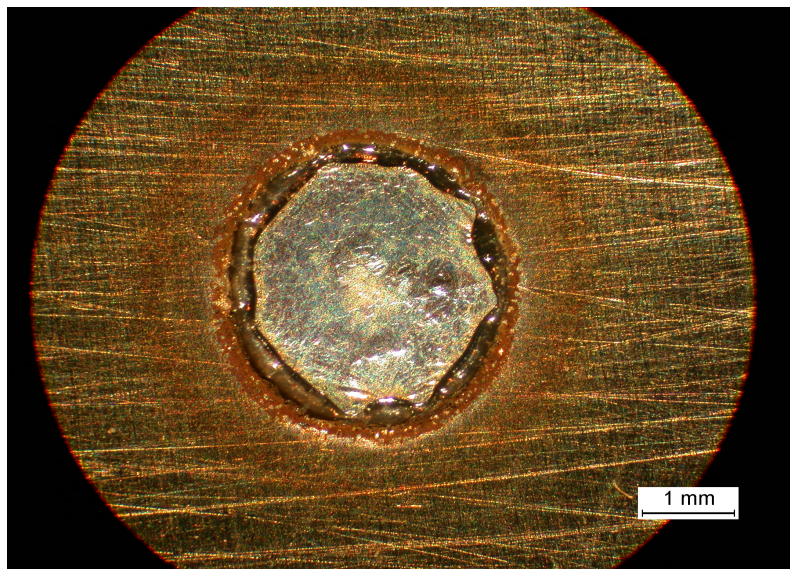
Trhliny se vyskytují pod osou nátavu i mimo osu.



Obr.7.2.3.b.Snímek metalografického výbrusu vzorku č.4



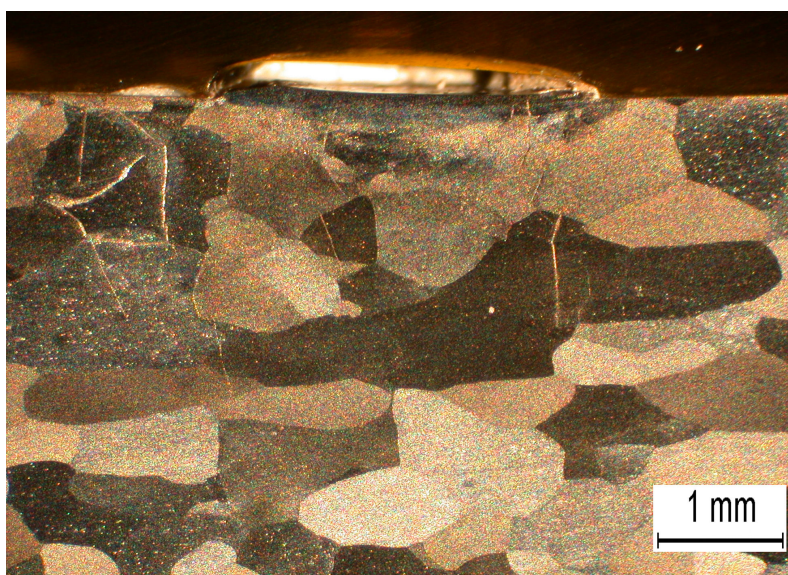
Vzorek č.5



Obr.7.2.4.a. Makroskopický snímek nátavu vzorku č.5,
pokus č.2

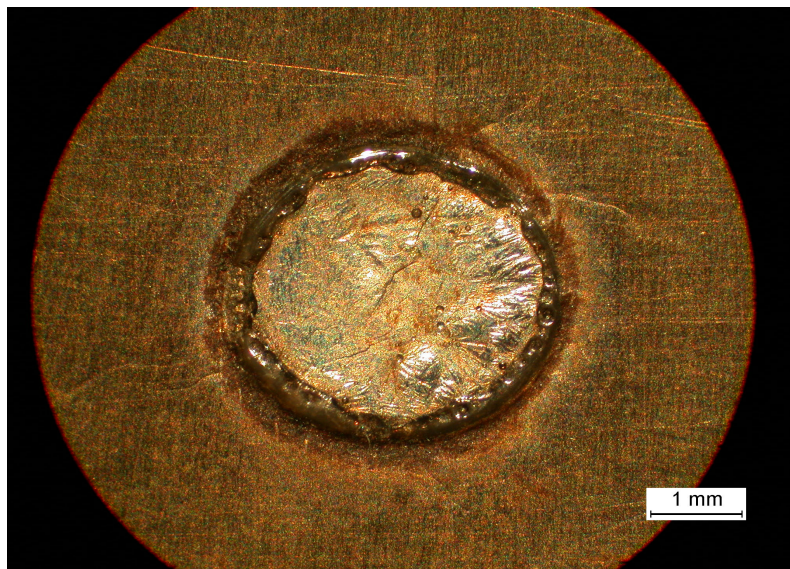
Snímek povrchu nátavu z experimentu č.5, bez předehřevu. Průměr nátavu je 3,14 mm. Z kapilární zkoušky jsou viditelné trhliny v ose nátavu i v jeho okolí.

V porovnání s tepelně ovlivněnou oblastí z minulého pokusu je v tomto případě oblast výraznější, zapříčiněná parametrem rozptýlu paprsku. Viditelné stopy na povrchu materiálu jsou stopy po broušení povrchu na brusce. Trhliny vznikly jak v ose nátavu, tak mimo osu nátavu. Trhliny dosahují cca 1,5 mm do hloubky materiálu. Trhliny jsou i lomového charakteru. Tepelně ovlivněná oblast není viditelná.



Obr.7.2.4.b. Snímek metalografického výbrusu vzorku č.5

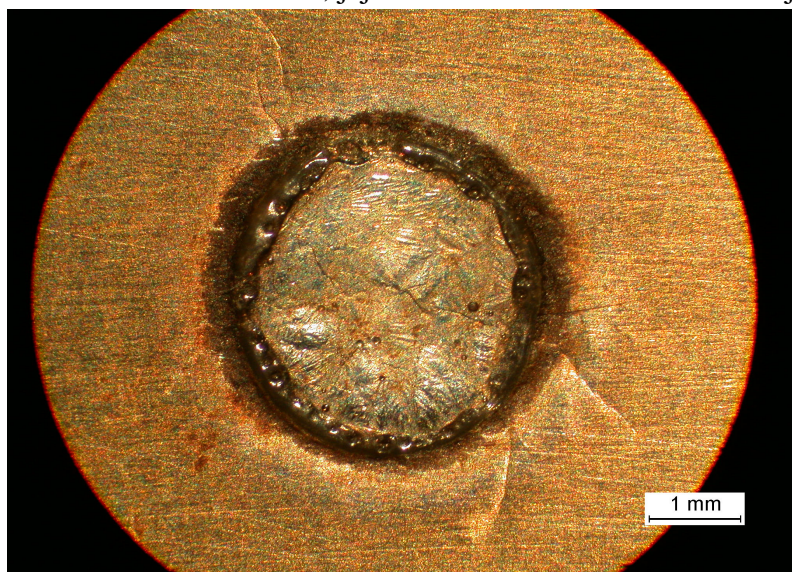
Vzorek č.6



Obr.7.2.5.a. Makroskopický snímek vzorku č.6a, pokus č.3

Snímky povrchu nátavu z experimentu č.6, bez předehřevu. Průměr nátavu je 3,31 mm. Na snímku jsou zjevné trhliny v nátavu a v okolí nátavu, jejich vzdálenost od středu nátavu je podstatně delší než u předchozího nátavu. Je viditelná i větší oblast tepelného ovlivnění, dáno opět parametrem rozptylu paprsku.

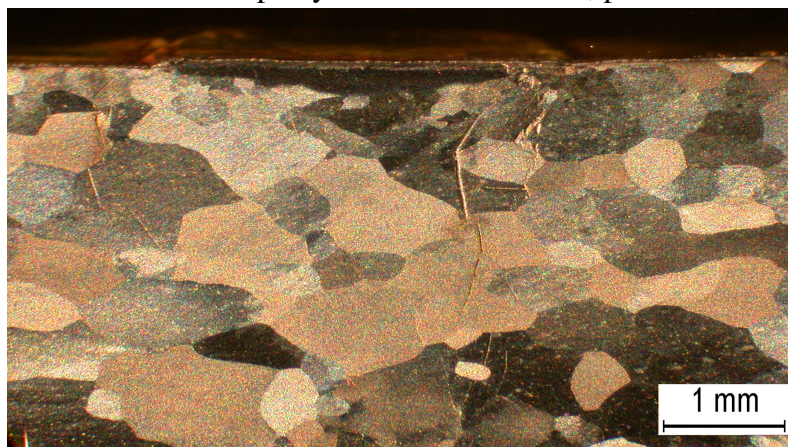
Trhliny dosahují hloubky cca 1,5 mm. Největší trhliny jsou na hraně nátavu. Tepelně ovlivněná oblast vně materiálu není viditelná.



Obr.7.2.5.a. Makroskopický snímek vzorku č.6b, pokus č.3

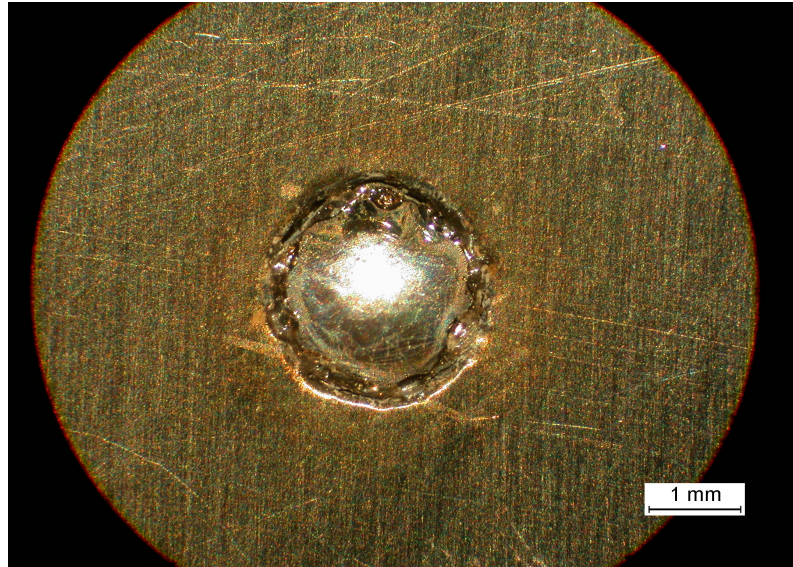
Obr.7.2.5.b.
metalografického
vzorku č.6

Snímek
výbrusu





Vzorek č.9



Obr. 7.2.6.a. Makroskopický snímek nátavu vzorku č.9,
pokus č.4

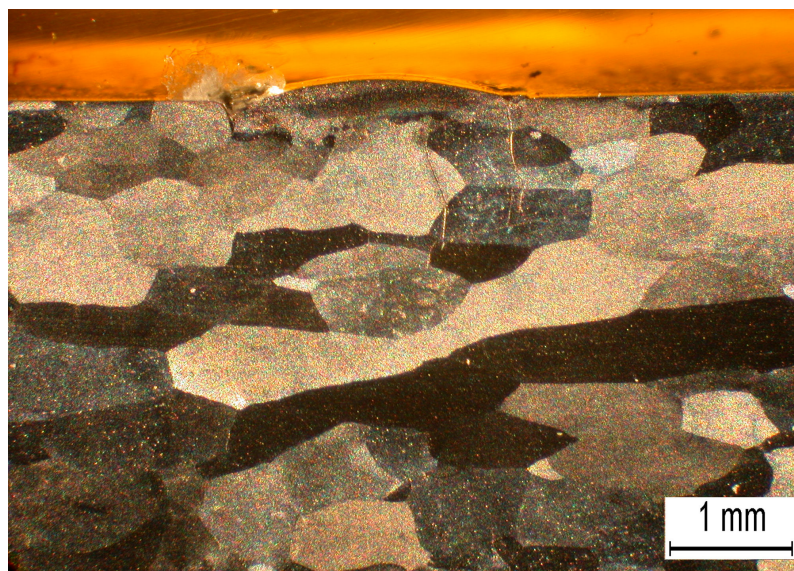
Snímek experimentu č.9, bez předeřevu.

Průměr nátavu je 2,60 mm.

Vzniklé viditelné trhliny jsou na hranici nátavu a v jednom místě v okolí nátavu.

Velikost trhlín je 2 mm do hloubky materiálu. Trhliny jsou z metalografického výbrusu viditelné i mimo hranice nátavu, tedy blíže do osy nátavu.

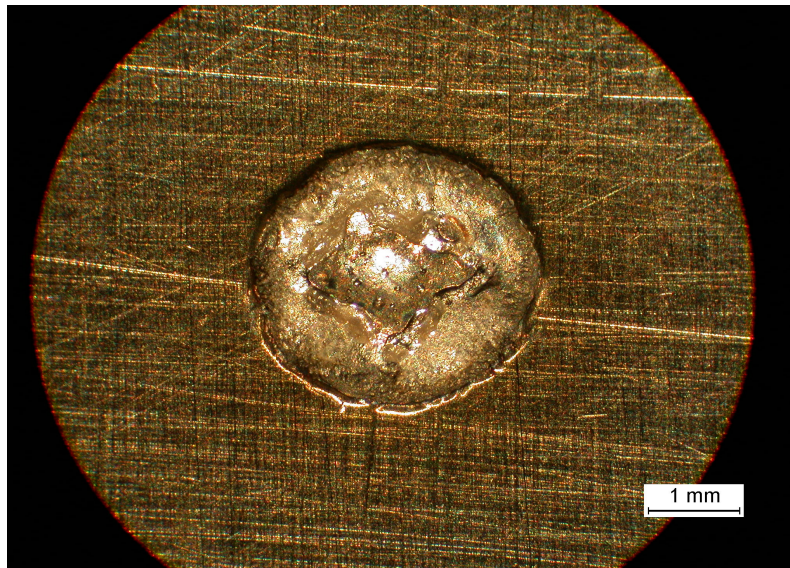
Tepelně ovlivněná oblast není viditelná.



Obr.7.2.6.b.Snímek metalografického výbrusu vzorku č.9



Vzorek č.7



Obr. 7.2.7.a. Makroskopický snímek nátavu vzorku č. 7,
pokus č. 5

Snímky experimentu č.7, bez předehřevu.

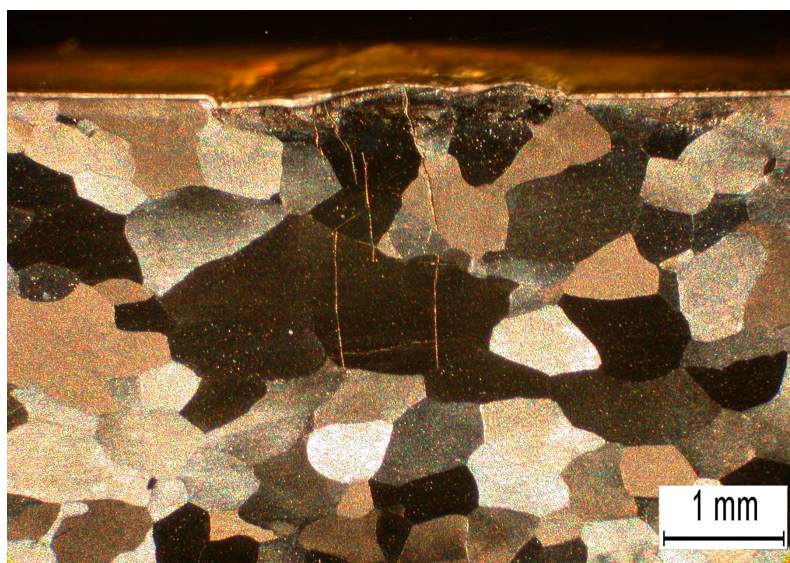
Průměr nátavu je 3,22 mm.

Z kapilárních zkoušek je patrný výskyt trhlin přímo v nátavu a na hranicích nátavu.

Trhliny dosahují velikosti 2 mm do hloubky materiálu.

Jejich výskyt je podstatně vyšší než v předchozím pokusu, dáno parametry laseru.

Změna struktury není viditelná.



Obr. 7.2.7.b. Snímek metalografického výbrusu vzorku č.7



Vzorek č.8



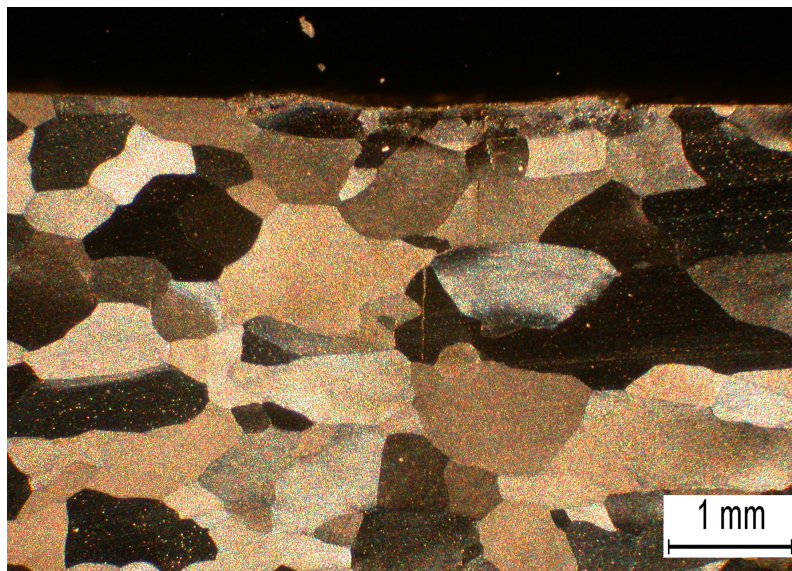
Obr.7.2.8.a . Makroskopický snímek vzorku č.8,
pokus č. 6

Makroskopický snímek vzorku č.8, bez předehřevu.

Průměr nátavu je 3,31 mm.

Z kapilárních zkoušek je patrný výskyt trhlin především na okrajích nátavu.

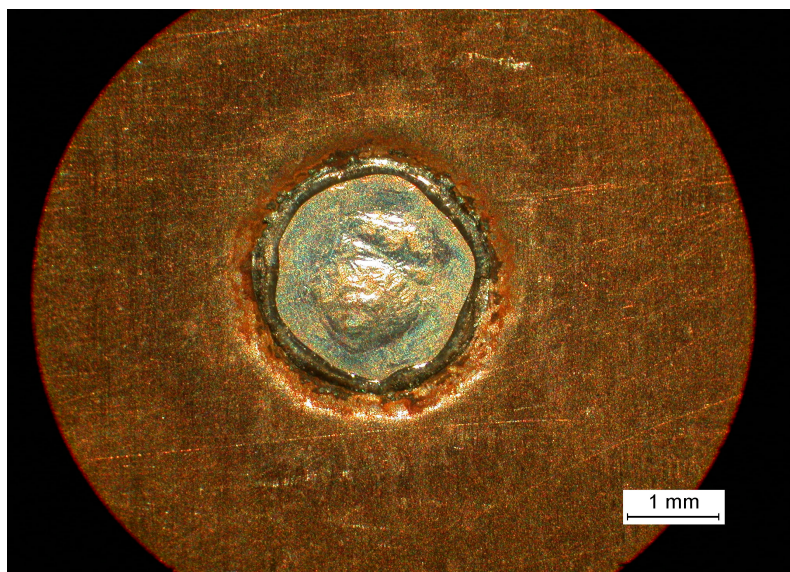
Z metalografického výbrusu je patrná trhlina i v ose nátavu, její velikost dosahuje 1,5 mm do hloubky materiálu.



Obr. 7.2.8.b. Snímek metalografického výbrusu vzorku č.8



Vzorek č. 10



Obr. 7.2.9.a. Makroskopický snímek nátavu vzorku č.10, pokus č. 7

Makroskopický snímek vzorku č. 10, předehřev na teplotu 400°C.

Průměr nátavu je 2,57 mm.

Z kapilárních zkoušek je viditelný výskyt trhlin na okraji nátavu a v oblasti mimo nátav.

Výskyt trhlin do hloubky materiálu není viditelný.

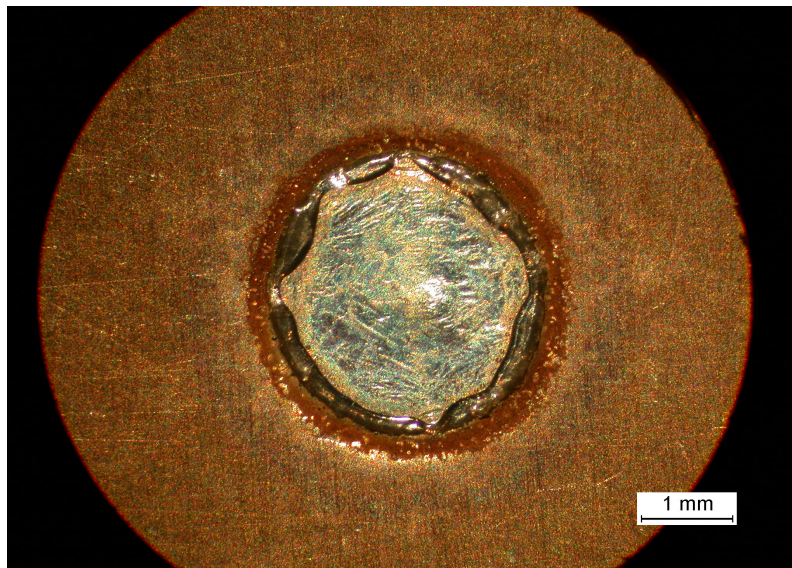
Je zde ovšem viditelná tepelně ovlivněná oblast, daná i předehřevem materiálu. Její velikost dosahuje do hloubky 1 mm. Změna struktury materiálu viditelná není.



Obr.7.2.9.b. Snímek metalografického výbrusu vzorku č. 10



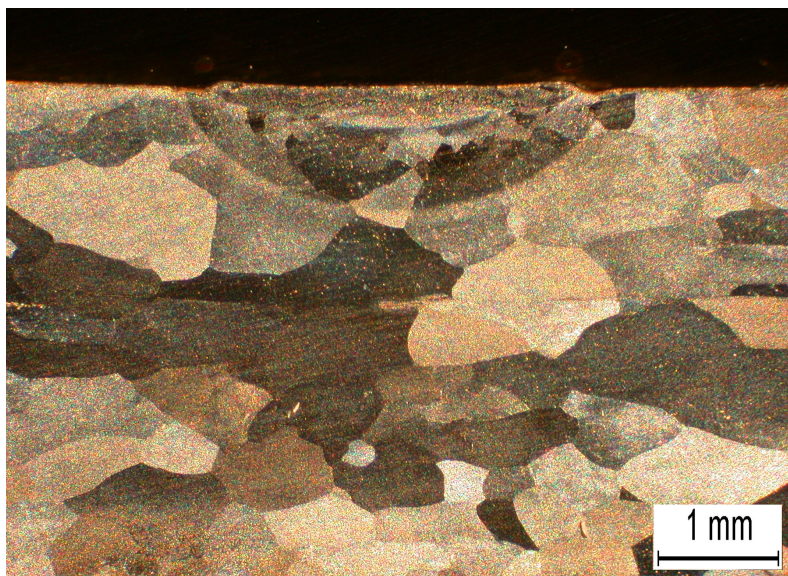
Vzorek č. 11



Obr. 7.2.10.a. Makroskopický snímek nátavu vzorku č.11,
pokus č. 8

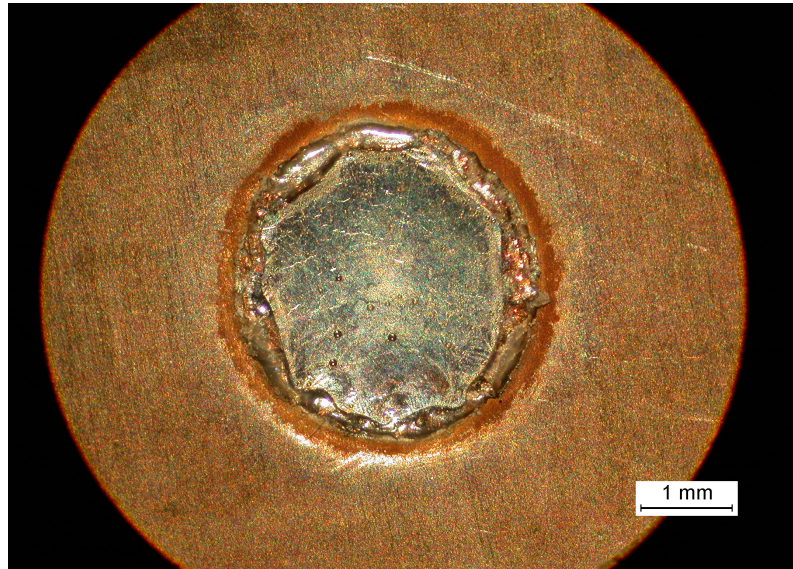
Snímek vzorku č. 11 s předeřevem na teplotu 400°C.

Průměr nátavu je 3,11 mm. Z kapilárních zkoušek jsou viditelné nepatrné trhliny v okraji nátavu a v okraji materiálu. Tato trhlina může být dána ohřevem materiálu a posléze jejím chladnutím, trhlina se vyskytuje i mimo osu nátavu. Trhlina v metalografickém výbrusu není viditelná. Je zde opět zřetelná tepelně ovlivněná oblast při zahřátí materiálu na danou teplotu. Na snímku není zřetelná změna struktury materiálu.



Obr. 7.2.10.b. Snímek metalografického výbrusu vzorku č.11

Vzorek č. 12



Obr. 7.2.11.a. Makroskopický snímek nátavu vzorku č.12, pokus č.9

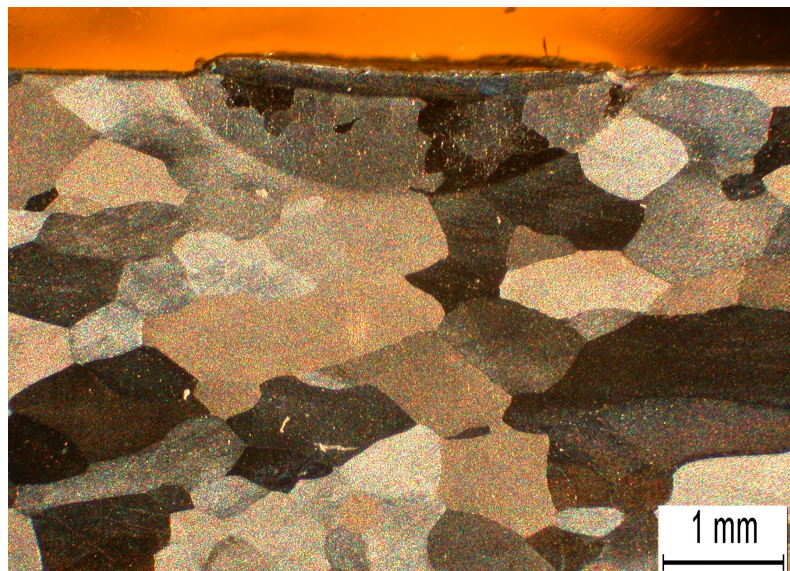
Snímek vzorku č. 12 s předehřevem na teplotu 400°C.

Průměr nátavu je 3,34 mm. Z kapilárních zkoušek není patrný výskyt trhlin.

Tepelně ovlivněná oblast dosahuje 1 mm tloušťky materiálu.

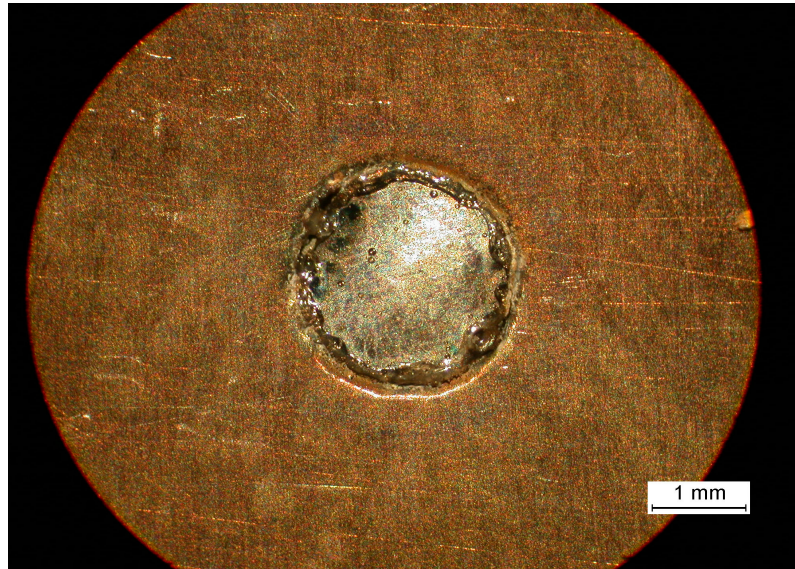
Z metalografického výbrusu není viditelná změna struktury materiálu.

.



Obr. 7.2.11.b. Snímek metalografického výbrusu vzorku č.12

Vzorek č. 13



Obr. 7.2.12.a. Makroskopický snímek vzorku č. 13,
pokus č. 10

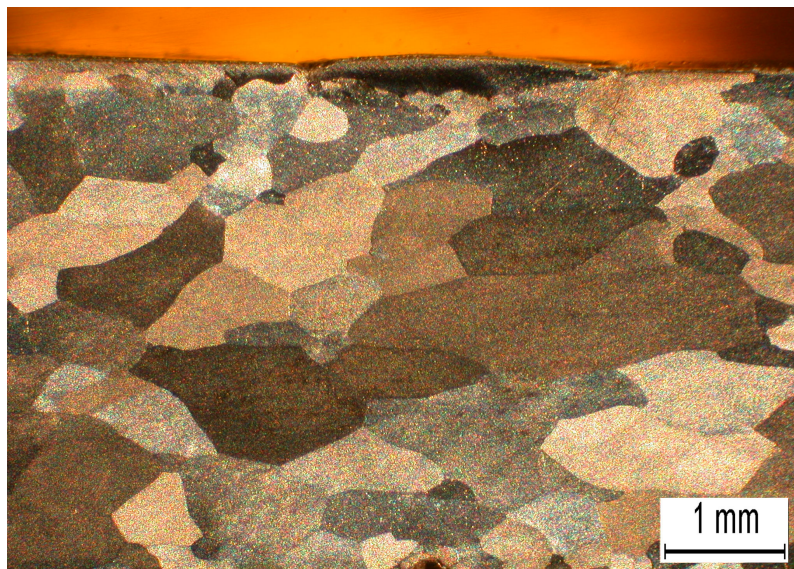
Snímek vzorku č. 13 s předehřevem na teplotu 400°C.

Průměr nátavu je 2,48 mm.

Z kapilárních zkoušek není patrný výskyt trhlin.

Tepelně ovlivněná oblast dosahuje cca 0,2 mm tloušťky materiálu.

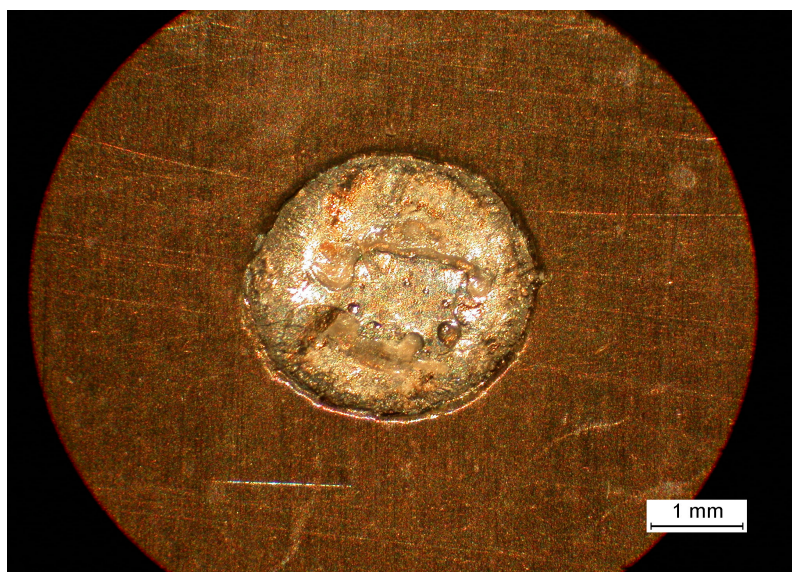
Na snímku metalografického výbrusu není patrná změna struktury materiálu.



Obr.7.2.12.b. Snímek metalografického výbrusu vzorku č. 13



Vzorek č. 14



Obr. 7.2.13.a. Makroskopický snímek nátavu vzorku č. 14, pokus č. 11

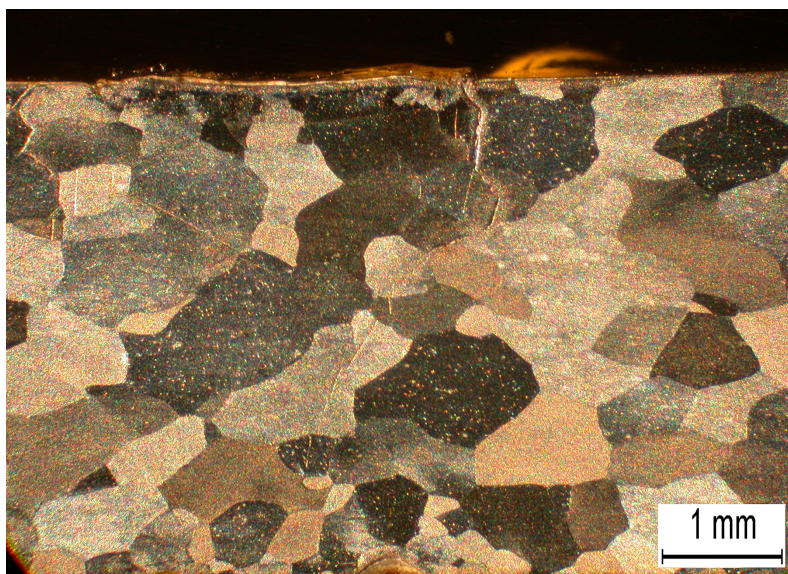
Snímek vzorku č. 14 s předehřevem na teplotu 400°C.

Průměr nátavu je 3,02 mm.

Z kapilárních zkoušek je patrný výskyt trhlin. Trhliny se vyskytují na samém okraji nátavu a v jeho blízkosti. Trhliny dosahují velikosti cca 1 mm do hloubky materiálu.

Tepelně ovlivněná oblast dosahuje cca 0,2 mm tloušťky materiálu.

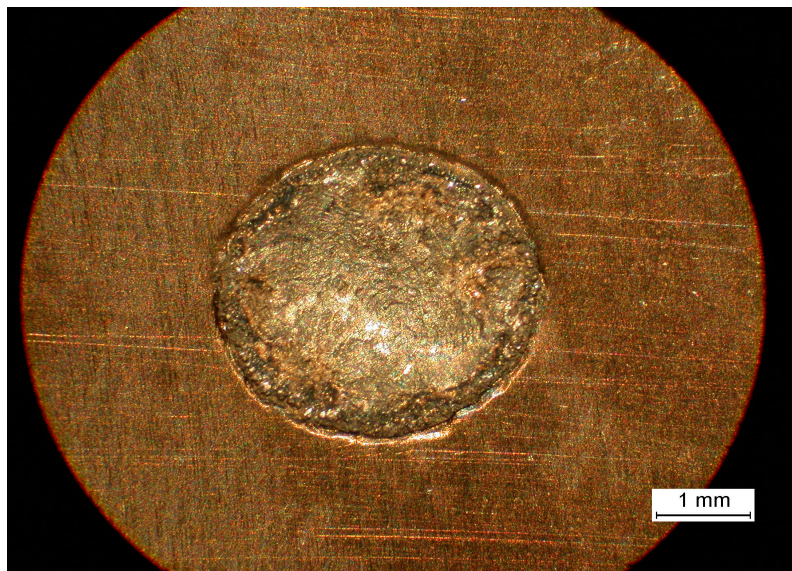
Na snímku není viditelná změna struktury materiálu.



Obr. 7.2.13.b. Snímek metalografického výbrusu vzorku č. 14

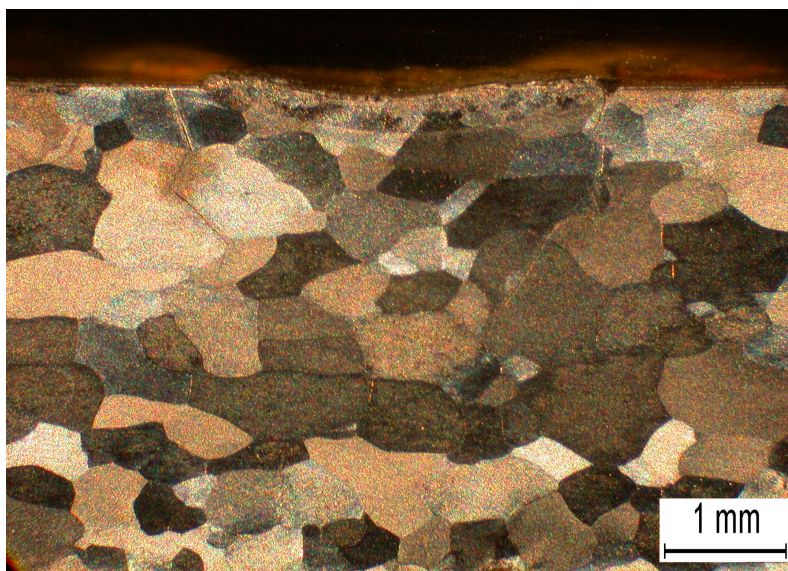


Vzorek č. 15.



Obr. 7.2.14.a. Makroskopický snímek nátavu vzorku č. 15,
pokus č. 12

Snímek vzorku č. 15 s předehřevem na teplotu 400°C. Průměr nátavu je 3,4 mm. Z kapilárních zkoušek je patrný výskyt trhlin. Trhlina se vyskytuje na samém okraji nátavu a v bezprostřední blízkosti nátavu. Trhlina dosahuje velikosti cca 1 mm do hloubky materiálu. Tepelně ovlivněná oblast dosahuje cca 0,3 mm tloušťky materiálu. Na snímku metalografického výbrusu není patrná změna struktury materiálu.



Obr. 7.2.14.b. Snímek metalografického výbrusu vzorku č. 15



8. Závěr

Svařování aluminidů železa je podle poznatků a informací v literatuře značně problematické. Realizované experimenty nátavů potvrdily podstatný problém při práci s těmito materiály, a to především výskyt trhlin za studena.

Na snímcích kapilárních zkoušek použitých vzorků pro experiment nejsou patrné žádné vady ani trhliny v materiálu.

Na makroskopických snímcích je viditelně rozdílný povrch natavení.

Na snímcích vzorků bez předehřevu, (tj. vzorky č. 4, 5, 6, 7, 8, 9) jsou patrné trhliny v mnohem větší míře než u vzorků s předehřevem (tj. vzorky č. 10, 11, 12, 13, 14, 15).

Na snímcích kapilárních zkoušek vzorků bez předehřevu po provedení experimentu jsou viditelné trhliny jak v nátavu, tak i v jeho okolí. Tyto trhliny vznikly především v době chladnutí vzorků, tedy za teplot blízkých teplotě okolí. Z metalografických výbrusů nejsou patrné změny ve struktuře materiálu ani jinak ovlivnění velikosti a hustoty zrn.

U vzorků s předehřevem z metalografického výbrusu nejsou patrné žádné trhliny v nátavu ani v jeho okolí, kde také došlo k dohřevu na teplotu 700°C pro snížení vnitřních pnutí v materiálu.

Pouze u vzorků č. 14 a č. 15 jsou patrné trhliny, které mohly vzniknout při chladnutí vzorků za nízkých teplot, neboť materiál při vysokých teplotách je velice tvárný.

U vzorků s předehřevem na metalografickém výbrusu jsou patrná tepelně ovlivněná pole, avšak v okolí nátavu nejsou viditelné změny ve struktuře materiálu. Tepelně ovlivněná pole u těchto vzorků jsou proměnná v závislosti na použitém výkonu laseru.

Z metalografických výbrusů je viditelná stopa trhlin, trhliny většinou sledují hranice zrn, některé trhliny také přecházejí i přes zrna.

Z hlediska technologie výroby základního materiálu zůstává k dořešení také ještě řada problémů pro vlastní metalurgii výroby. Z pohledu svařitelnosti tohoto materiálu lze za základní cíl pro metalurgii a celý výrobní postup materiálu pokládat zlepšení plastických vlastností materiálu aluminidu železa. Vlastní vývoj pro uplatnění technologie svařování dílů z aluminidu železa si vyžádá další úsilí.

Získané výsledky a hodnoty dále získané z experimentu budou nadále využity pro další výpočty a simulace v programu SYSWELD, po doplnění údajů o materiálu aluminidu železa do tohoto programu.



9. Použitá literatura

- [1] Maťátko, J. : Elektronika – Lasery, kvantové generátory světla, Idea servis, Praha 1998
- [2] **Vrbová, M. a kolektiv. : Oborová encyklopedie. Lasery a moderní optika, Prometheus, Praha 1994**
- [3] Sochor, V. : Lasery a koherentní svazky, Academia, Praha 1990
- [4] Kuncipál, J. : Svařování pro konstruktéry a technology, SNTL, Praha 1980
- [5] Ing. Blabla J. CSc. : Lasery ve výzkumu a průmyslu, Sborník přednášek 4. celostátní konference „Lasery ve výzkumu a průmyslu“ ve Velkých Karlovicích 1982
- [6] **Vrbová, M. – Jelínková, H. – Gavrilov, P. : Úvod do laserové techniky, ČVUT, Praha 1998**
- [7] **Dunovský, J. : Speciální technologie, ČVUT, Praha 1984**
- [8] **Novák, R.– Králová, R.– Nováková, D. – Pavel, J. – Sopko, B. : Fyzika II, ČVUT, Praha 1996**
- [9] Dunovský, J. a kol.: Speciální metody svařování, ČSVTS, Plzeň 1985
- [10] Strumban, E.J., Štoll, I.: Lasery a optoelektronika, Panorama, Praha 1989
- [11] Okerblom, N.O., Konstrukčně-technologické projektování svařovacích konstrukcí, SNTL, Praha 1971
- [12] Hrivňák, I.: Teória zvariteľnosti kovov a zlatin, Veda- vydavateľstvo Slovenskej akademie vied Bratislava, 1989
- [13] N.O.Okerblom : Konstrukčně-technologické projektování svařovaných konstrukcí, SNTL, Praha 1971
- [14] Neumann, H: Současný stav a perspektivy svařování aluminidu železa. In: Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování. Sborník přednášek., s25-43, Ostravice, ISBN 80-248-0443-3
- [15] McKamey, C.G.: Iron aluminides, In Physical metalurgy and processing of intermetallic compounds, ed. N.S.Stoloff, V.K.Sikka. Chapman & Hall, 1996, s 351-391.
- [16] Dubenský R, Ing, Ing. Synovský J. Vybrané statš ze svařování a defektoskopie, ČVUT 1983
- www stránky**
- [16] Dělení, spojování, svařování materiálů



-
- Dostupné na <<http://www.dssm.cz/>>
- [17] Klimeš, V. : Seminární práce z fyziky - Laser [online]. [cit. 2001-11].
Dostupné na <<http://www.hyperlink.cz/tks/laser.htm>>
- [18] Třešňák, K. : Principy laserů a jejich rozdělení [online]. [cit. 2001-11].
Dostupné na <http://www.printing.cz/art/ctp/ctp_principy_laseru.html>
- [19] Laser Technology, Inc.
Dostupné na <<http://www.lasertech.com/productline/industrial.html>>
- [20] AMT The Association For Manufacturing Technology
Dostupné na <<http://www.mfgtech.org>>
- [21] <http://www.mendelova.cz/pages/didac/f/laser.htm#cesta>
- [22] informace o materiálu aluminidu železa
dostupné na www.elsevier.cz

manuály

- [23] manuál k laseru JK 701,
dostupné v LCP Praha



Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 27. května 2005

.....

Petr Macháček
Husova ul. 286
551 01 Jaroměř



Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

27. května 2005

Podpis



Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date

27. May 2005

Signature